

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERÍA**

**“ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UN
SOFTWARE DE MODELOS Y SIMULACIÓN DE
UN CANAL MÓVIL PARA LAS BANDAS DE
850 MHz. Y 1900 MHz.”**

CHRISTIAN OMAR CEVALLOS TIPÁN

Sangolquí - Ecuador

2006

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el proyecto de grado para obtención del título de Ingeniería Electrónica “Análisis y desarrollo de un software de modelos y simulación de un canal móvil para las bandas de 850 MHz y 1900 MHz.” fue realizado en su totalidad por el señor Christian Omar Cevallos Tipán con CI: 171511214-8 bajo nuestra dirección.

Ing. Darío Duque

DIRECTOR

Ing. Rubén León.

CODIRECTOR

RESUMEN

El presente proyecto define y explica los principales modelos de predicción de pérdidas de propagación, y analiza las principales características de un canal móvil mediante un software que permite calcular las pérdidas en ambientes celulares tanto de macroceldas como de microceldas además de simular y caracterizar un canal móvil.

El programa genera un entorno fundamentalmente didáctico el cuál facilita el análisis de sistemas de comunicaciones móviles obteniendo así una mejor comprensión del comportamiento de un canal móvil, permitiendo al usuario concentrarse en entender mas claramente los resultados obtenidos.

El software obtiene pérdidas de propagación para un amplio rango de frecuencias especialmente para las bandas en que los operadores celulares trabajan, para distancias que van desde los metros para microceldas a los kilómetros para macroceldas y toma en cuenta las diversas correcciones necesarias para caracterizar diferentes entornos móviles. Mientras que en su parte de simulación caracteriza un canal móvil multirayecto utilizando el modelo de dispersores que está basado en la teoría de rayos, suponiendo que la señal que llega al receptor es la suma de rayos que, partiendo del transmisor, inciden, al menos, en un elemento dispersor y alcanzan el receptor. Además obtiene las funciones del sistema móvil y funciones estadísticas para el análisis, diseño y simulación de comunicaciones móviles.

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a todas las personas que confiaron en mí y que creyeron que esto se iba a ser realidad, por supuesto a mis padres que se esforzaron por mí todo este tiempo y porque no a las personas que no lo creyeron, va por ellos también.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar me gustaría agradecer a Dios por darme la vida sin la cuál no podría cumplir ninguna de las metas que me he trazado, a mis padres por el incondicional apoyo que me brindan día a día dejando de lado sus propios problemas y necesidades para ayudarme a ser una persona mejor y a mis profesores por darme el conocimiento necesario para un buen desempeño en la vida profesional.

También quiero agradecer a todas las personas que fueron un apoyo para mí en estos años de carrera y que tuvieron que ver de una u otra manera con el desarrollo de este proyecto, no me he olvidado de ninguno ya que mi persona no se podría haber desarrollado sin el aporte de cada uno de ellos.

My time is now!

PRÓLOGO

La evaluación de las prestaciones de los sistemas de comunicaciones y su optimización se basan fundamentalmente en su modelado, bien en términos de formulaciones analíticas cuya evaluación se basa en el uso de programas CAD matemático, o bien apoyados en simuladores que reproducen, mediante programas de computador, con el grado de detalle deseado, el comportamiento de un sistema. En general el modelado analítico de las predicciones de nivel de señal y cobertura en un sistema de comunicaciones móviles resulta complejo mientras se van usando modelos más realistas. El uso de simuladores está limitado por la carga computacional que representan, por lo que es fundamental elegir cuidadosamente las técnicas de simulación y la complejidad de los modelos a implementar, en función de los resultados que se buscan.

En las etapas finales de desarrollo de los sistemas la evaluación de las prestaciones se realiza sobre maquetas hardware de los mismos. Obviamente ello resulta costoso en los sistemas de comunicaciones y solo es abordable por los fabricantes y operadoras y ya en la fase pre-operacional de los sistemas. Es por esto que el presente proyecto presenta técnicas de simulación para estudiar diversos aspectos del funcionamiento del canal móvil generando un entorno fundamentalmente didáctico el cuál ayuda a comprender las materias de telecomunicaciones como Comunicaciones Móviles de una manera más sencilla además de obtener una mejor comprensión de diversos aspectos complejos que encierra un canal móvil dejando de lado los tediosos cálculos matemáticos y permitiendo que el usuario se concentre en entender el significado de los resultados obtenidos.

Existen diversas herramientas software tales como COSSAP o SPW para el desarrollo de nivel de procesamiento de señal o de enlaces y BON y OPNET para simuladores de nivel de sistema. Este tipo de herramientas son muy costosas y suelen requerir el uso de estaciones de trabajo con sistemas operativos UNIX, por lo que están fuera del alcance de los usuarios comunes. Por otra parte sistemas de programación visual como Visual C++ y Visual Basic y herramientas como Matlab pueden ejecutarse bajo Windows, existen

versiones de las mismas para estudiantes a precios reducidos y son de uso cada vez más generalizado en entornos universitarios.

Visual C++ y Visual Basic son herramientas de programación para crear aplicaciones bajo Windows e implementación de interfaces gráficas de usuario, Matlab es un lenguaje de alto nivel para realizar cálculos técnicos integra cálculo, visualización y programación en un entorno de uso sencillo, se utiliza para cálculo matemático, desarrollo de algoritmos, modelado y simulación matemática. Por ello se han seleccionado para el desarrollo del proyecto y mediante estas se implementan los ambientes celulares macro y micro para las bandas en que los operadores de nuestro país están trabajando proveyendo así un producto que beneficia a todas las personas que estén trabajando o estudiando el canal móvil en particular y las comunicaciones móviles en general.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN AL CANAL MÓVIL

1.1. Propagación en canales móviles.....	19
1.2. Análisis del comportamiento del canal móvil.....	21
1.2.1. Distribución normal o Gaussiana.....	23
1.2.2. Distribución Rayleigh.....	25
1.2.3. Distribución Rayleigh y log-normal: RLN.....	26
1.2.4. Distribución Nakagami-Rice.....	27

CAPÍTULO 2

MODELOS DE PROPAGACIÓN Y CANAL MULTITRAYECTO

2.1. Modelo de espacio libre.....	28
2.2. Principales mecanismos de propagación.....	29
2.3. Zona de Fresnel.....	29
2.4. Difracción filo de cuchillo.....	31
2.5. Modelos de propagación para macroceldas y cobertura en ambientes abiertos.....	32
2.5.1. Modelo de Egli.....	32
2.5.2. Modelo de Okumura.....	33
2.5.3. Modelo Okumura-Hata.....	34
2.5.4. Modelo de Ikegami.....	36
2.5.5. Modelo Walfish-Bertoni.....	39
2.5.6. Modelo de Lee.....	40
2.5.7. Modelo Sakagami-Kuboi.....	43
2.5.8. Modelo COST-231.....	44

2.5.8.1. Modelo COST-Walfish-Ikegami.....	44
2.5.8.2. Modelo COST-Hata.....	47
2.6. Modelos de propagación para microceldas.....	48
2.6.1. Modelos LOS.....	48
2.6.1.1. Método 1.....	48
2.6.1.2. Método 2.....	48
2.6.1.3. Método 3.....	49
2.6.2. Modelos de NLOS.....	49
2.6.2.1. Modelo COST-231 Lund.....	49
2.6.2.2. Modelo Dresde.....	50
2.7. Modelos de canales multitrayecto.....	50
2.8. Tipos de modelo.....	56
2.9. Modelo determinístico de dispersores.....	57
2.10. Funciones de sistema.....	60
2.11. Función de respuesta impulsiva IDSF.....	66
2.12. Función de transferencia variable con el tiempo TVTF.....	70
2.13. Función de dispersión retardo-desplazamiento Doppler DDSF.....	71
2.14. Estadísticas de las señales de respuesta.....	73

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL SOFTWARE DE MODELOS DE PROPAGACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CANAL MÓVIL EN VISUAL C++/VISUAL BASIC/MATLAB

3.1. Análisis de los modelos de propagación más importantes.....	77
3.2. Programación de los modelos para microceldas.....	78
3.2.1. Programación de modelos LOS.....	80
3.2.1.1. Programación modelo Lund.....	81
3.2.1.2. Programación modelo UIT-R 8/1.....	82
3.2.2. Programación modelos NLOS.....	83
3.2.2.1. Programación modelo COST-231 Lund.....	84
3.2.2.2. Programación modelo Dresde.....	85
3.3. Programación de los modelos para macroceldas y ambientes abiertos.....	86

3.3.1. Programación del modelo Okumura-Hata/COST-231 Hata.....	87
3.3.2. Programación del modelo de Egli.....	89
3.3.3. Programación del modelo de Ikegami.....	89
3.3.4. Programación del modelo Sakagami-Kuboi.....	90
3.3.5. Programación del modelo Walfish-Bertoni.....	92
3.3.6. Programación del modelo COST-231.....	93
3.4. Programación del simulador del canal móvil.....	95
3.4.1. Programación del modelo de dispersores.....	96
3.4.2. Programación de funciones del sistema.....	96
3.4.2.1. Programación del gráfico para la amplitud relativa a LOS.....	97
3.4.2.2. Programación del gráfico para la fase de la señal recibida.....	98
3.4.2.3. Programación del gráfico para el módulo respuesta en frecuencia del canal TVTF.....	98
3.4.2.4. Programación del gráfico para el módulo del espectro de la señal recibida.....	99
3.4.2.5. Programación del gráfico para el perfil retardo-potencia.....	101
3.4.2.6. Programación del gráfico para level crossings rate LCR.....	102
3.4.2.7. Programación del gráfico para average duration of fades ADF....	102
3.4.2.8. Programación del gráfico para densidad espectral de frecuencia..	103

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL SOFTWARE DE MODELOS DE PROPAGACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CANAL MÓVIL

4.1. Análisis de resultados de los modelos de propagación para microceldas.....	105
4.1.1. Análisis de resultados para los modelos LOS.....	105
4.1.1.1. Análisis de resultados para el modelo Lund.....	106
4.1.1.2. Análisis de resultados para el modelo UIT-R 8/1.....	109
4.1.2. Análisis de resultados para los modelos NLOS.....	112
4.1.2.1. Análisis de resultados para el modelo COST 231 Lund.....	112
4.1.2.2. Análisis de resultados para el modelo Dresde.....	116
4.2. Análisis de resultados de los modelos de propagación para macroceldas.....	119
4.2.1. Análisis de resultados modelo de Egli.....	119

4.2.2. Análisis de resultados para el modelo Okumura-Hata, COST 231-Hata....	122
4.2.3. Análisis de resultados para el modelo de Ikegami.....	125
4.2.4. Análisis de resultados para el modelo de Walfish-Bertoni.....	128
4.2.5. Análisis de resultados para el modelo Sakagami-Kuboi.....	131
4.2.6. Análisis de resultados modelo COST 231 (Walfish-Ikegami).....	133
4.3. Análisis de resultados de la simulación de un canal móvil.....	137

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.....	164
5.2. Recomendaciones.....	166

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	167
--	------------

ANEXO I.....	168
---------------------	------------

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. 2.1. Parámetros del modelo de Lee.

Tabla. 2.2. Relaciones de Fourier entre las funciones de sistema.

Tabla. 2.3. Expresiones de las transformaciones entre funciones de sistema.

Tabla. 2.4. Relaciones entre las funciones de correlación de sistema para canales multitrayecto.

Tabla. 2.5. Funciones características de canales móviles WSSUS.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura. 1.1. Función densidad de probabilidad gaussiana.
- Figura. 2.1. Modelo espacio libre.
- Figura. 2.2. Mecanismos de propagación en ambiente urbano.
- Figura. 2.3. Elipsoides de Fresnel.
- Figura. 2.4. Atenuación por obstáculo.
- Figura. 2.5. Filo de cuchillo
- Figura. 2.6. Modelo de Bullington
- Figuras. 2.7. (a) y (b) Curvas Okumura.
- Figura. 2.8. Rayos principales y secundarios.
- Figura. 2.9. Modelo Ikegami.
- Figura. 2.10. Modelo Walfish- Bertoni.
- Figura. 2.11. Modelo cálculo pérdidas propagación NLOS.
- Figura. 2.12. Dispersión temporal del medio de transmisión.
- Figura. 2.13. Dispersión en frecuencia del medio de transmisión.
- Figura. 2.14. Notación de señales.
- Figura. 2.15. Puntos inicial y final modelo dispersores.
- Figura. 2.16. PDP típico con NF
- Figura. 2.17. Densidad espectral.
- Figura. 2.18. Esquema perfil Rayleigh.
- Figura .2.19. $S_r(f)$
- Figura. 3.1. Creación del proyecto cccorpmobile.
- Figura. 3.2. Creación de un Single document.
- Figura. 3.3. Creación de LOS y NLOS.
- Figura. 3.4. Creación de modelos LOS.
- Figura. 3.5. Modelo de Lund.
- Figura. 3.6. Modelo UIT-R 8/1
- Figura. 3.7. Modelos NLOS
- Figura. 3.8. Modelo COST 231-Lund.

Figura. 3.9. Modelo Dresde.

Figura. 3.10. Modelos de macroceldas.

Figura. 3.11. Modelo Okumura-Hata/COST 231-Hata.

Figura. 3.12. Modelo de Egli.

Figura. 3.13. Modelo de Ikegami.

Figura 3.14. Geometría del modelo de Ikegami

Figura 3.15. Modelo Sakagami-Kuboi.

Figura. 3.16. Geometría del modelo SK.

Figura. 3.17. Modelo Walfish-Bertoni

Figura. 3.18. Geometría del modelo Walfish-Bertoni.

Figura. 3.19. Modelo COST -231.

Figura. 3.20. Geometría del modelo COST-231.

Figura. 3.21. Simulador del canal móvil.

Figura. 3.22. Cuadro de diálogo Amplitud relativa a LOS.

Figura. 3.23. Cuadro de diálogo Fase de la señal recibida.

Figura. 3.24. Cuadro de diálogo módulo respuesta en frecuencia del canal.

Figura. 3.25. Barra de herramientas Add-inn

Figura. 3.26. Cuadro de diálogo Módulo del espectro de la señal recibida.

Figura. 3.27. Cuadro de diálogo Perfil retardo-potencia.

Figura. 3.28. Cuadro de diálogo Level crossings rate.

Figura .3.29. Cuadro de diálogo Average duration of fades.

Figura. 3.30. Cuadro de diálogo densidad espectral de frecuencia.

Figura. 4.1. Modelos LOS.

Figura. 4.2. Ingreso de variables de entrada para el modelo Lund.

Figura. 4.3. Resultados para el modelo Lund.

Figura. 4.4. Ingreso de variables de entrada modelo Lund.

Figura. 4.5. Resultados modelo Lund.

Figura. 4.6. Ingreso de variables de entrada modelo UIT-R 8/1.

Figura. 4.7. Resultados para el modelo UIT-R 8/1.

Figura. 4.8. Ingreso de variables de entrada modelo UIT-R 8/1.

Figura.4.9. Resultados modelo UIT-R 8/1.

Figura. 4.10. Modelos NLOS.

Figura. 4.11. Ingreso de datos modelo COST 231 Lund

Figura. 4.12. Resultados modelo COST 231 Lund.

Figura. 4.13. Ingreso de variables de entrada modelo COST 231 Lund.

Figura. 4.14. Modelo Lund.

Figura. 4.15. Resultados modelo COST 231 Lund.

Figura. 4.16. Información del modelo COST 231 Lund.

Figura. 4.17. Ingreso de variables de entrada para el modelo Dresde.

Figura. 4.18. Resultados modelo Dresde.

Figura. 4.19. Ingreso de datos modelo Dresde.

Figura. 4.20. Resultados modelo Dresde.

Figura. 4.21. Modelos de propagación para macroceldas.

Figura. 4.22. Ingreso de variables de entrada para el modelo de Egli.

Figura. 4.23. Resultados modelo de Egli.

Figura. 4.24. Ingreso de variables de entrada para el modelo de Egli.

Figura. 4.25. Resultados modelo de Egli.

Figura. 4.26. Ingreso de datos para el modelo Okumura-Hata.

Figura. 4.27. Resultados modelo de Hata.

Figura. 4.28. Ingreso de datos modelo COST 231-Hata

Figura. 4.29. Resultados para el modelo Hata.

Figura. 4.30. Ingreso de datos modelo de Ikegami.

Figura. 4.31. Resultados modelo de Ikegami.

Figura. 4.32. Ingreso de variable modelo de Ikegami.

Figura. 4.33. Resultados modelo de Ikegami.

Figura. 4.34. Información modelo de Ikegami.

Figura. 4.35. Ingreso de datos modelo Walfish-Bertoni.

Figura. 4.36. Resultados modelo Walfish-Bertoni.

Figura. 4.37. Ingreso de datos modelo Walfish-Bertoni.

Figura. 4.38. Resultados modelo Walfish-Bertoni.

Figura. 4.39. Geometría del modelo Walfish-Bertoni.

Figura. 4.40. Ingreso de datos modelo SK.

Figura. 4.41. Resultados modelo SK.

Figura. 4.42. Ingreso de datos modelo SK.

Figura. 4.43. Resultados modelo SK.

Figura. 4.44. Ingreso de datos modelo COST 231.

Figura. 4.45. Resultados modelo COST 231.

Figura. 4.46. Ingreso de datos modelo COST 231

Figura. 4.47. Resultados modelo COST 231.

Figura. 4.48. Geometría del modelo COST 231.

Figura. 4.49. Entrada al simulador.

Figura. 4.50. Ingreso de parámetros de entrada del simulador de un canal móvil.

Figura. 4.51. Resultados de la simulación.

Figura. 4.52. Amplitud relativa a LOS.

Figura. 4.53. Fase de la señal recibida.

Figura. 4.54. Gráfico de TVTF.

Figura. 4.55. Módulo del espectro de la señal recibida.

Figura. 4.56. Perfil retardo – potencia.

Figura. 4.57. Level crossings rate.

Figura. 4.58. Average duration of fades.

Figura. 4.59. Densidad espectral de frecuencia.

Figura. 4.60. Ingreso de datos para la Simulación del canal móvil

Figura. 4.61. Resultados de la simulación.

Figura. 4.62. Amplitud relativa a LOS.

Figura. 4.63. Fase de la señal recibida.

Figura. 4.64. Gráfico de TVTF.

Figura. 4.65. FFT de la señal recibida.

Figura. 4.66. Perfil retardo-potencia.

Figura. 4.67. Gráfico de LCR.

Figura. 4.68. Gráfico de ADF.

Figura. 4.69. Gráfico de la Densidad espectral de frecuencia.

Figura. 4.70. Ingreso de datos simulación canal móvil.

Figura. 4.71. Resultados de la simulación.

Figura. 4.72. Amplitud relativa a LOS.

Figura. 4.73. Fase de la señal recibida.

Figura. 4.74. Gráfico de TVTF

Figura. 4.75. FFT de la señal recibida.

Figura. 4.76. Gráfico del perfil retardo-potencia.

Figura. 4.77. Gráfico de LCR.

Figura. 4.78. Gráfico de ADF.

Figura. 4.79. Densidad espectral de frecuencia.

GLOSARIO

PMR	Private Mobile Radio
PMT	Public Mobile Telephony
COST	Cooperativa Europea para la investigación científica
LOS	Línea de visión directa
NLOS	No línea de visión directa
GTD	Teoría geométrica de la difracción
FSF	Frequency Selective Fading
TSF	Time Selecting Fading
BER	Bit Error Rate
ISDF	Input Delay Spread Function
TVTF	Time variable transfer Function.
DDSF	Doppler delay Spread Function
OSDF	Output Doppler Delay Function
LCR	Level Crossing Rate
ADF	Average Duration of Fades
RLN	Rayleigh-Log normal
SK	Sakagami – Kuboi
DS	Doppler Spread
ISI	Interferencia intersímbolos
PBE	Señal pasa bajo equivalente
PDP	Power Delay Profile
NF	Noise Floor
FM	Frecuencia modulada
CDMA	Code Division Multiple Access
GSM	Global System for Mobile communication
UMTS	Universal Mobile Communication Service
WSSUS	Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN AL CANAL MÓVIL

1.1 PROPAGACIÓN EN CANALES MÓVILES

Los sistemas móviles vienen caracterizados por tres aspectos fundamentales que los hacen diferentes del resto de sistemas de comunicaciones en lo que a aspectos de propagación se refiere:

- Cobertura alrededor de un emplazamiento de estación base o repetidora, por contraposición a la comunicación punto a punto, en tanto que se pretende que las comunicaciones sean posibles en una zona concreta y extensa, y como tal, son necesarias las predicciones de señal recibida en la mayoría de los puntos de la zona a cubrir como medio de garantizar que los usuarios dispondrán de una cierta calidad en el servicio.
- Existencia de múltiples trayectos entre transmisor y receptor, por la existencia de múltiples obstáculos físicos entre ellos, que producen efectos de reflexión, difracción y refracción que originan réplicas de las señales originales.
- Variación continua en los ejes temporal y espacial de los trayectos entre estación base y terminal móvil, de modo que constantemente se observa variación en la potencia recibida en el terminal.

Como consecuencia de ello, y para poder estimar cuáles serán las situaciones en que se pueden encontrar los usuarios del sistema en cada momento, se realizan cuatro actividades básicas en relación con el estudio de los canales móviles:

- Parametrización y caracterización del canal móvil en banda estrecha, para determinar la pérdida básica de propagación entre el transmisor y el receptor en la zona de cobertura considerada. Se dice que esta pérdida presenta habitualmente tres contribuciones:

- Pérdidas por propagación en el espacio libre, es decir, en un espacio donde las pérdidas solo se ven afectadas por la distancia recorrida y la frecuencia de la onda que se propaga.
- Pérdidas producidas por la presencia de obstáculos en el terreno (edificios, elevaciones del terreno, vegetación, etc.)
- Pérdidas producidas por el terreno inmediatamente circundante al receptor, que determina cierta característica de la variación de la señal recibida.

El estudio de esta caracterización se completa progresivamente con los nuevos métodos que constantemente se proponen. Éstos se suelen valorar fundamentalmente de acuerdo con los criterios de complejidad, rapidez y exactitud.

- Parametrización y caracterización del canal móvil en banda ancha, dado que con el progresivo avance tecnológico y la creciente necesidad de transmisión de altas velocidades de datos, las modulaciones necesitan anchos de bandas crecientes que en los modernos sistemas digitales se ven afectados por la propagación multitrayecto, especialmente importante en entornos montañosos y zonas urbanas circundantes al móvil.
- Diseño y preparación de modelos de simulación de los canales en estudio, fundamentalmente para el modelado del canal con modelos físicos, implementados en software y hardware, a fin de calcular coberturas teóricas previstas y tasas de errores (BER). Los modelos software los usan generalmente los gabinetes de estudio de coberturas y planificación celular, y los modelos hardware los fabricantes de terminales para su diseño y posterior comprobación. Todos estos modelos pretenden analizar la pérdida básica de propagación y los efectos multitrayecto.
- Recogida de medidas radioeléctricas y/o potencia, según el entorno a medir (campo en el ámbito de los sistemas PMR más clásicos y potencia en el entorno de los sistemas mas avanzados), medidas destinadas a validar la caracterización de los canales traducida a los modelos de simulación anteriores, y que serán determinantes para conocer la exactitud de los mismos¹. Esta es una práctica común en todos los

¹ Hernando, José; Pérez, Fonlan, *Introduction to Mobile Communications Engineering*, 3ra Edición, Artech House, Boston 1999

- despliegues de redes de cobertura móvil, que pretende adicionalmente realizar un ajuste fino de la cobertura lograda, pretendiendo destacar los puntos negros (vacíos de cobertura) que han ido generándose como consecuencia de que el despliegue real con toda probabilidad no ha coincidido con la planificación inicial.

1.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL CANAL MÓVIL

El canal móvil, lejos de ser estático, es especialmente variable como consecuencia del carácter zonal de la cobertura. Esto se traduce en que para una potencia de transmisión P_{TX} constante, la potencia recibida P_{RX} será variable.

La variabilidad de la señal recibida se puede expresar como superposición de una componente de señal fija, más una serie de componentes variables de carácter estadístico. Se evalúa la primera de las influencias que se aprecian en la caracterización del canal móvil: la distancia. Se dice por tanto que la pérdida básica de propagación (l_b) varía con la distancia entre el transmisor y el receptor (d):

$$l_b(d) = K \cdot d^n \rightarrow n = f(\text{medio de propagación, altura antena de referencia})$$

$$l_0 = l_b(1) = K \rightarrow l_b(d) = l_0 \cdot d^n \xrightarrow{dB} L_b(d) = L_0 + 10n \cdot \log d \quad (1.1)$$

Se observa como entra en juego una variable n cuyo valor exacto es función del medio en que se esté propagando la señal, y la altura de la antena de referencia considerada.

Se suman también dos influencias que faltaban considerar:

- Obstáculos en el trayecto entre el transmisor y el receptor, cuya atenuación vendrá caracterizada por una distribución estadística gaussiana (normal).
- El entorno inmediatamente próximo al móvil (en una radio menor a 100λ), donde la variación vendrá marcada por la distribución de Rayleigh, condición de multitrayecto que afecta especialmente a las señales de banda ancha.

Las distribuciones estadísticas se definen como:

- Desvanecimiento lento o por sombra, donde para cada punto del plano de coordenadas (x,y) la pérdida básica se expresa como:

$$l_b(d) = l(b) \cdot g(x, y) = K \cdot d^n \cdot g(x, y) \xrightarrow{dB} L_b(d) = L(d) + G(x, y) \quad (1.2)$$

Nótese que donde antes se hablaba directamente de l_b ahora se incluye una componente que da idea de la variación estática observada. Esta componente seguirá una variación gaussiana o normal.

- Desvanecimiento rápido, donde la baja altura de las antenas de los receptores hace que aparezca un nuevo factor de variabilidad por la presencia de obstáculos próximos, que originan una multiplicidad de trayectos de propagación que son la fuente de variación rápida del nivel (campo eléctrico o más habitualmente potencia) de la señal recibida. La variación viene caracterizada por una variable aleatoria r , dependiente de la distancia (por tanto, del tiempo) y de la frecuencia de la señal en cuestión. La variable aleatoria r es proporcional al cuadrado de una magnitud que sigue la distribución de Rayleigh:

$$l_b(d) = l(b) \cdot g(x, y) \cdot r(t, f) = K \cdot d^n \cdot g(x, y) \cdot r(t, f) \xrightarrow{dB} L_b(d) = L(d) + G(x, y) + R(t, f) \quad (1.3)$$

R es una variable aleatoria de media 0. Así, el promedio de $L_b(d)$ es un pequeño recorrido del receptor:

$$\bar{L}_b(d) = L(d) + G(x, y) ; \text{ Media local} \quad (1.4)$$

Si se promedia en los largos recorridos del receptor:

$$\overline{\overline{L}_b(d)} = L(d) ; \text{ Media zonal} \quad (1.5)$$

La conclusión a la que se llega con esta expresión es que la pérdida experimentada por la señal, cuando nos fijamos en un pequeño entorno próximo al receptor, podemos obviar la variación según Rayleigh, y si nos fijamos en una zona aún más amplia, también podemos olvidar la variación gaussiana. De este modo, haciendo abstracción en el entorno, básicamente nos quedamos con la pérdida debida fundamentalmente a la distancia y a la frecuencia sabiendo que entornos más próximos al receptor se producen variaciones estáticas de la señal de acuerdo con las distribuciones comentadas².

² Hernando, José; Pérez, Fonlan, *Introduction to Mobile Communications Engineering*, 3ra Edición, Artech House, Boston 1999

1.2.1 Distribución normal o gaussiana

La distribución gaussiana es también conocida con el nombre de distribución normal. Aplicada al mundo de las comunicaciones, la distribución en cuestión cabe ser aplicada sobre dos magnitudes de interés, la intensidad de campo eléctrico y sobre la potencia. Se debe recordar que la relación existente entre estas dos magnitudes es una basada en que la potencia depende del cuadrado de la intensidad del campo eléctrico. Además la forma habitual de tratar las dos magnitudes es en unidades logarítmicas.

Bajo esta distribución estadística la variación del campo recibido expresado en dB μ v/m, en las distintas ubicaciones varía como:

$$(dB) \rightarrow f(E) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2} \left[\frac{E-\bar{E}}{\sigma_L}\right]^2\right]} \quad (1.6)$$

f(E) fddp (función densidad de probabilidad).

$$\bar{E} = E\{E\} = \int_{-\infty}^{\infty} E \cdot f(E) dE \quad \text{Media de E} \quad (1.7)$$

σ_L = Desviación Típica = f (terreno, frecuencia)

σ_L = (150 a 200 MHz \rightarrow 8dB; 450MHz \rightarrow 10dB; 900MHz \rightarrow 7dB)

Para la medición de la calidad de un enlace se utilizan las probabilidades de que el valor del campo eléctrico esté por encima de un valor umbral, que da idea del mínimo valor que ha de tener la intensidad de campo eléctrico para una correcta recepción:

$P_{corte} = F(E_u) = \text{Pr obabilidad}(E \leq E_u) \rightarrow F$ es la función acumulativa.

$P_{cobertura} = G(E_u) = \text{Pr obabilidad}(E > E_u) = 1 - P_{corte} \rightarrow G$ es la función complementaria.

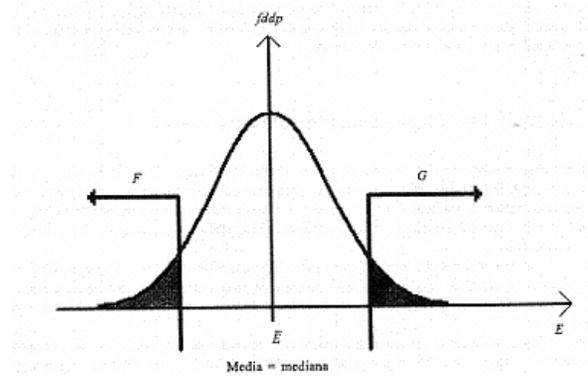


Figura. 1.1. Función densidad de probabilidad gaussiana.

Para el cálculo exacto de las funciones que determinan la probabilidad de corte o funcionamiento se debe recurrir a la estadística clásica, que establece la resolución de las integrales siguientes, bien con tablas o aproximaciones numéricas, como el camino para el resultado definitivo:

$$t = \frac{E - \bar{E}}{\sigma_L} \rightarrow \begin{cases} F(t_u) = \left\| t_u = \frac{E_u - \bar{E}}{\sigma_L} \right\| = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t_u} e^{-\frac{u^2}{2}} du \\ G(t_u) = \left\| t_u = \frac{E_u - \bar{E}}{\sigma_L} \right\| = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_u}^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du \end{cases} \quad (1.8)$$

En el ámbito de los sistemas PMR (Private Mobile Radio) o de radiotelefonía privada sí suele ser habitual el trabajo en unidades de campo eléctrico. Sin embargo, en el terreno de los sistemas PMT (Public Mobile Telephone) o de radiotelefonía pública, más que con valores de campo, se trabaja con valores de potencia. Puesto que la relación entre E y P expresados en dB es lineal, se dice que la P_{RX} (dB) sigue también una ley gaussiana con el mismo valor de la desviación típica σ_L :

$$(dB) \rightarrow f(P) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2} \left[\frac{P - \bar{P}}{\sigma_L} \right]^2 \right]} \quad (1.9)$$

Si expresamos P en unidades naturales (watts) pasando a considerar la variable p, la densidad de probabilidad f(p) sigue una log-normal de mediana \bar{p} y desviación típica σ_n :

$$(w) \rightarrow f(p) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{p} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(p-\bar{p})}{\sigma_n} \right]^2}; p \geq 0 \quad (1.10)$$

$$p = 10^{\frac{P}{10}}; \bar{p} = 10^{\frac{\bar{P}}{10}}; \sigma_n = 0.23\sigma_L$$

La razón de representar esta expresión en unidades normales además de en dB, cuando lo habitual suele ser lo último, es porque se da el caso de que los cálculos de interferencias de varias estaciones sobre una, los cálculos que se realizan en el peor de los casos, y esto contempla la suma de las potencias de las señales interferentes en unidades normales para que tenga sentido físico.

1.2.2 Distribución de Rayleigh

Esta distribución se usa para describir la variación estadística de la envolvente de la señal resultante de la propagación multitrayecto, por superposición de señales de parecida amplitud y fase aleatoria, generadas en el caso de un entorno próximo al móvil.

Si r es una envolvente o amplitud en unidades naturales, la función densidad de probabilidad:

$$(v) \rightarrow f(r) = \frac{r}{b} e^{-\left(\frac{r^2}{2b}\right)}; r \geq 0 \quad (1.11)$$

$$b = \frac{\overline{r^2}}{2}; \text{Mediana} = \tilde{r} = 1.18\sqrt{b}$$

$$f(r) = 1.386 \frac{r}{\tilde{r}^2} e^{-0.693 \left(\frac{r}{\tilde{r}}\right)^2} = \int_{r_u}^{\infty} p(r) dr \quad (1.12)$$

Si ahora se usa unidades de potencia en vez de unidades de tensión:

$$p = \frac{r^2}{2} \rightarrow (w) \rightarrow f(p) = \frac{\ln 2}{\tilde{p}} e^{-\left(\ln 2\right) \frac{p}{\tilde{p}}}; p > 0 \quad (1.13)$$

$\tilde{p} = \tilde{r}^2 / 2; \text{potencia_mediana}$

Así pues:

$$F(p) = \text{Función de distribución} = 1 - e^{-\left[\frac{p \ln 2}{\tilde{p}}\right]} = \int_{-\infty}^p f(u) du = 1 - \int_p^{\infty} f(u) du \quad (1.14)$$

$$\begin{aligned} \bar{p} &= b; b = \bar{r}^2 / 2; \bar{p} = \tilde{p} / \ln 2 \\ F(p) &= 1 - e^{-\left[\frac{p}{\bar{p}}\right]} \end{aligned} \quad (1.15)$$

1.2.3 Distribución de Rayleigh y log-normal: RLN

Las variaciones estadísticas en ciertas circunstancias y en entornos específicos se salen fuera de la generalidad expuesta.

Este es el caso de muchas aplicaciones de sistemas móviles en medios urbanos (por ejemplo, la variación del campo eléctrico a lo largo de una calle); el campo recibido en una zona sigue una ley de Rayleigh con media variable, la cual se distribuye de unas zonas a otras con ley log-normal.

Esta variación estadística configura una distribución mixta bastante habitual, que tiene una formulación matemática relativamente compleja que se presenta a continuación:

Sea p la variable aleatoria que representa la variación de la potencia de una señal multitrayecto, que sigue una ley exponencial negativa en valores absolutos:

$$\text{Función distribución complementaria} \rightarrow G_p(p) = e^{-\left(\frac{p}{\bar{p}}\right)} \quad (1.16)$$

\bar{p} es la media local en un pequeño recorrido (8 a 10m de calle, por ejemplo). Esta media a su vez varía de unas zonas a otras según una distribución log-normal, con $\bar{\bar{p}}$ la media de \bar{p} en un largo recorrido.

\bar{p} = media local; $\bar{\bar{p}}$ = media sectorial

$$f_p(\bar{p}) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi\bar{p}}} e^{-\left[\frac{\left\{\ln\left(\frac{\bar{p}}{\bar{\bar{p}}}\right)\right\}^2}{2\sigma_n^2}\right]} \quad (1.17)$$

Así la distribución global p será mixta, RLN, con función de distribución complementaria:

$$G(p) = \int_0^{\infty} G(p/\bar{p}) \cdot f_p(\bar{p}) \cdot d\bar{p} = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi\bar{p}}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\bar{p}} \cdot e^{-\left[\frac{\left\{\ln\left(\frac{\bar{p}}{\bar{\bar{p}}}\right)\right\}^2}{2\sigma_n^2}\right]} \cdot e^{-\left(\frac{p}{\bar{p}}\right)} d\bar{p} \quad (1.18)$$

1.2.4 Distribución Nakagami-Rice

Otra distribución que describe alguna de las situaciones típicas encontradas en entornos de comunicaciones móviles es la distribución de Nakagami-Rice. Se utiliza esta descripción estadística para las variaciones de la intensidad de campo de una señal formada por una componente determinista y varias aleatorias.

Esta es una situación que acontece típicamente en los sistemas de comunicaciones móviles con multitrayecto LOS y NLOS. Es decir al móvil llegan múltiples señales, una de las cuáles tiene un valor fijo y claro por existir visión directa entre el transmisor y el receptor y otras consecuencias del multitrayecto existente.

La función densidad de probabilidad para esta situación, siendo r la representación de la tensión será:

$$f(r) = \frac{r}{b} e^{-\left[\frac{r^2+c^2}{2b}\right]} I_0\left(\frac{cr}{b}\right) \quad (1.19)$$

- $2b$ es el valor cuadrático medio de la componente aleatoria de la señal multitrayecto.
- c es el valor eficaz de la señal directa LOS
- I_0 es la función de Bessel modificada de primera especie y orden 0.

En ocasiones se expresa la distribución como función de un parámetro $k = c^2/2b$;

- Si $c = 0$, nos encontramos ante la típica función de Rayleigh.
- Si $c \gg \sqrt{b}$, nos encontramos ante una distribución gaussiana con media de la variable r , $\bar{r} = c$ y desviación típica $\sigma = \sqrt{b}$:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{b}} e^{-\left[\frac{(r-c)^2}{2b}\right]} \sqrt{\frac{r}{c}} \quad (1.20)$$

La distribución de Nakagami-Rice es más general que la gaussiana o la de Rayleigh por separado, en tanto que puede convertirse en cualquiera de ellas con una adecuada configuración de los parámetros.

CAPÍTULO 2

MODELOS DE PROPAGACIÓN Y CANAL MULTITRAYECTO

2.1 MODELO DE ESPACIO LIBRE.

Las predicciones de nivel de señal y cobertura son de vital importancia en el diseño de sistemas de radio móviles. Básicamente hay 3 maneras de obtener una aproximación al nivel de señal recibido:

1. Modelos empíricos: simples pero no del todo exactos.
2. Mediciones: exactas pero requieren de gran esfuerzo y tiempo.
3. Una combinación de las dos anteriores, se utilizan modelos empíricos corregidos con algunas mediciones de cada una de las zonas a predecir.

El modelo de espacio libre es el más simple de todos, asume que el canal de RF está libre de cualquier obstáculo que pueda afectar a la propagación como absorción, difracción, reflexión o dispersión. Tiene muy poco uso para realizar predicciones para telefonía celular pero dada su sencillez muchas veces puede usarse para realizar cálculos rápidos. Las pérdidas por trayectoria serán solamente función de la distancia entre transmisor y receptor³.

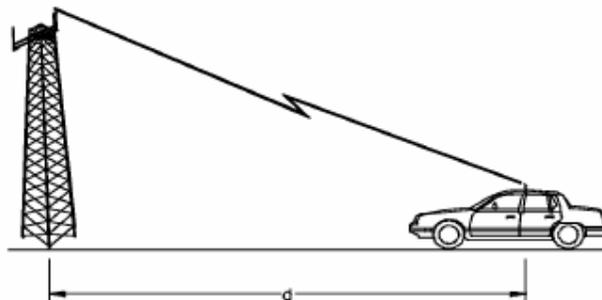


Figura. 2.1. Modelo espacio libre.

La pérdida entre transmisor y receptor se expresa como:

³Sendin, Alberto, *Fundamentos de los Sistemas de Comunicaciones Móviles*, 2da Edición, McGraw Hill, España 2004

$$L_{el} = 10 \cdot \log \left(\frac{4\pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.1)$$

Donde: d: distancia [m]

λ : longitud de onda [m]

Escribiendo $\lambda=c/f$ y expresando las pérdidas de dB:

$$L_{el} = 32.45 + 20 \log (d) + 20 \log (f) \quad (2.2)$$

Donde f se expresa en MHz.

2.2 PRINCIPALES MECANISMOS DE PROPAGACIÓN

Si consideramos los efectos provocados por la superficie de la tierra, mejoraremos la exactitud del modelo. Hay diversos fenómenos que influyen en la propagación que son generalmente atribuidos a tres mecanismos básicos de propagación: reflexión, difracción y dispersión. En un ambiente urbano típico en las comunicaciones móviles se dan estos tres fenómenos simultáneamente, se ejemplifican en la **Figura 2.2**.

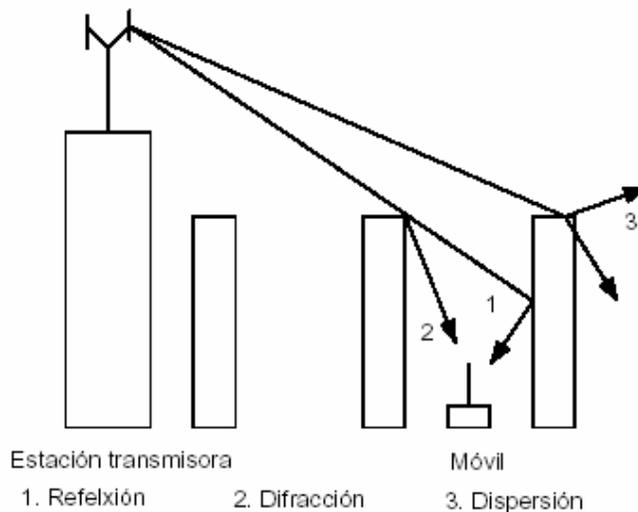


Figura. 2.2. Mecanismos de propagación en ambiente urbano.

2.3 ZONA DE FRESNEL

De acuerdo con el principio de Huygen, cada elemento del frente de onda produce un frente de onda secundario, teniendo en la antena receptora infinidad de frentes de onda incidiendo los cuales se suman o resta de acuerdo a su fase relativa (función de la

diferencia de caminos recorridos). El efecto queda determinado por una familia de elipsoides alrededor del rayo directo denominadas elipsoides de Fresnel.

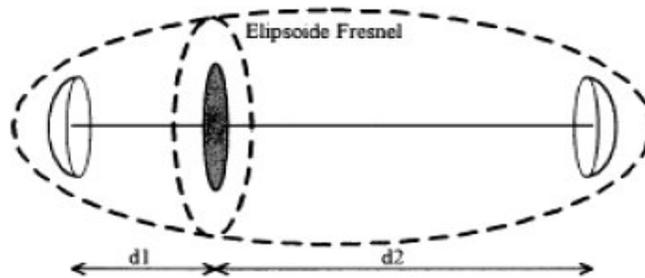


Figura. 2.3. Elipsoides de Fresnel.

En la **Figura 2.3** se ve la conformación de las zonas de Fresnel. Los radios de dichas zonas se pueden calcular como:

$$F_n = \sqrt{\frac{n\lambda.d1.d2}{d}} \quad (2.3)$$

Cabe destacar que las zonas pares suman destructivamente a la señal y que la primera zona de Fresnel transporta más de la mitad de la energía total. La atenuación producida por un obstáculo puede ser calculada en función del despeje de la primera zona de Fresnel:

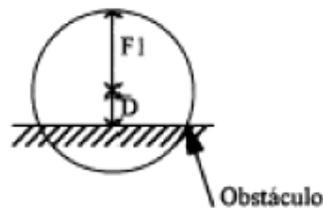


Figura. 2.4. Atenuación por obstáculo.

$$A_t = 10 + 20\log(D/F1) \quad (2.4)$$

Donde A_t es la atenuación por obstáculo expresada en dB.

2.4 DIFRACCIÓN FILO DE CUCHILLO

Cuando un sólo objeto causa el desvanecimiento puede ser tratado como un filo de cuchillo para estimar las pérdidas por difracción.

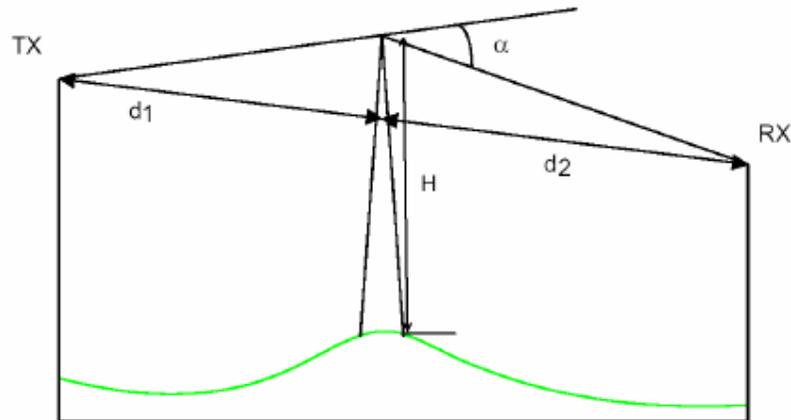


Figura. 2.5. Filo de cuchillo

Las pérdidas causadas se suman a las de espacio libre y pueden ser calculadas utilizando:

$$A(v) \approx 6.02 + 9.1v - 1.27v^2 \rightarrow v \leq 2.4 \quad \text{o} \quad (2.5)$$

$$A(v) \approx 12.953 + 20\log(v) \rightarrow v > 2.4 \quad (2.6)$$

Donde: $v = H \sqrt{\frac{2d}{d_1 d_2 \lambda}}$

Bullington propuso una técnica para calcular las pérdidas de difracción cuando se cruzan 2 obstáculos, proponiendo un nuevo obstáculo efectivo en la línea de vista de las dos antenas:

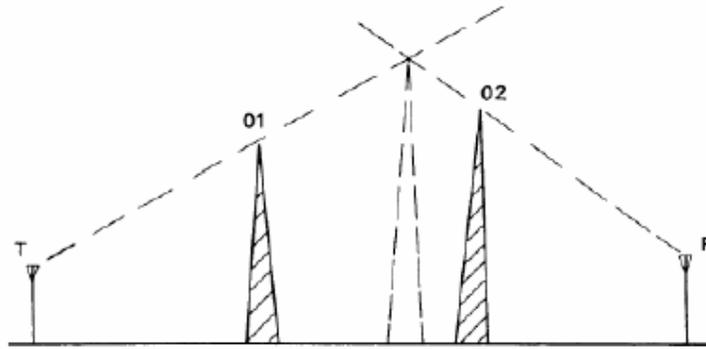


Figura. 2.6. Modelo de Bullington

2.5 MODELOS DE PREDICCIÓN PARA MACROCELAS Y COBERTURA EN AMBIENTES ABIERTOS

En las radiocomunicaciones zonales de punto a zona existe una gran variabilidad de trayectos de propagación. Un estudio suele efectuarse analizando perfiles a lo largo de radiales trazados desde el transmisor en distintas direcciones acimutales. Es habitual trabajar, como mínimo, con 12 radiales.

Los métodos empíricos proporcionan una estimación rápida de la pérdida básica de propagación o alternativamente, de la intensidad de campo en cualquier punto en torno a un transmisor. Son de utilización sencilla y rápida, pero no son exactos⁴.

2.5.1 Modelo de Egli.

En el año 1957 luego de realizar gran cantidad de mediciones Egli concluyó que la atenuación de la señal decrecía con la potencia 4 de la distancia y, en contraste con el modelo de plano de tierra, era dependiente de la frecuencia. Propuso un modelo semi-empírico dado por:

$$L_E = 40 \log(d) - 20 \log(h_b h_m) + 40 \log\left(\frac{f}{40}\right) \quad (2.7)$$

Donde:

f: frecuencia [MHz]

h_b : altura antena estación base (transmisor) [m]

h_m : altura antena estación móvil (receptor) [m]

⁴Sendin, Alberto, *Fundamentos de los Sistemas de Comunicaciones Móviles*, 2da Edición, McGraw Hill, España 2004

d : distancia entre antena transmisora y receptora [m]

Este modelo es válido para frecuencias superiores a 40 MHz e inferiores a 1 GHz y terrenos irregulares.

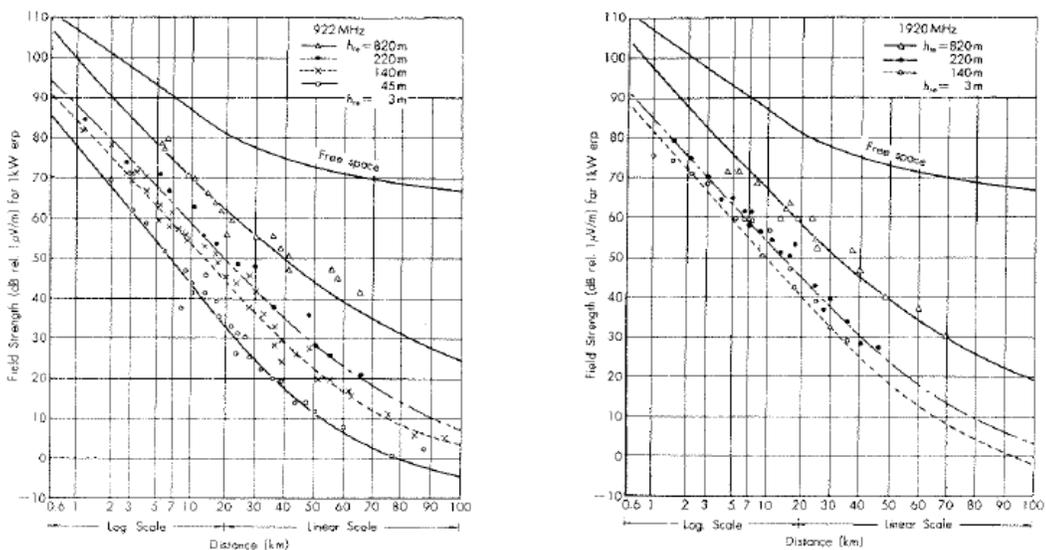
2.5.2 Modelo Okumura.

El modelo de Okumura es el más difundido. Es completamente empírico basado en una gran cantidad de mediciones realizadas en el área de Tokio. Los resultados son analizados estadísticamente y son mostrados en una serie de curvas que muestran el nivel de señal en función de la distancia para diferentes alturas de antenas y frecuencias.

Dado que todas las mediciones fueron realizadas en terreno casi plano y área urbana, Okumura introdujo factores de corrección para ajustar la predicción en áreas abiertas y diferentes tipos de terreno: montaña, mar, sierra, etc.

Este modelo es válido para frecuencias entre 150-1920 MHz, distancias de 1-100 Km. y altura de antenas de estación base entre 30 y 100 mts.

En las **Figuras 2.7** se pueden ver algunas de las curvas de registradas por Okumura luego de sus mediciones.



Figuras 2.7. (a) y (b) Curvas Okumura.

El modelo puede ser expresado como:

$$L_0 = L_{el} + A - G(h_B) - G(h_m) - G(A) \quad (2.8)$$

Donde:

L_{el} : atenuación de espacio libre.

A : atenuación relativa, obtenida de las curvas.

h_B : altura antena transmisora [m]

h_m : altura antena receptora [m]

G : ganancia de acuerdo al tipo de morfología

y donde:

$$G(h_B) = 20 \log\left(\frac{h_B}{200}\right) \rightarrow 30m < h_B < 1000m \quad (2.9)$$

$$G(h_m) = \begin{cases} 10 \log\left(\frac{h_m}{3}\right) \rightarrow h_m < 3m \\ 20 \log\left(\frac{h_m}{3}\right) \rightarrow 3m < h_m < 10m \end{cases} \quad (2.10)$$

El modelo se ajusta bien en regiones urbanas pero no así en áreas abiertas, además, tiene la gran desventaja de depender de la interpretación de curvas para obtener el resultado.

2.5.3 Modelo Okumura-Hata.

La conveniencia de informatizar el método de Okumura condujo a Hata al desarrollo de expresiones numéricas para las curvas de propagación de Okumura, incluyendo, además, las correcciones más usuales utilizadas en las radiocomunicaciones móviles. Hata obtuvo, mediante el análisis de regresión múltiple, una serie de expresiones que proporcionan la pérdida básica de propagación, L_b , para medios urbanos, suburbanos y rurales. La fórmula fundamental de Hata, que proporciona L_b en un medio urbano y sirve de referencia para los demás entornos de propagación es la siguiente:

$$L_b = 69.55 + 26.26 \log(f) - 13.82 \log(h_t) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log(h_t)) \log(d) \quad (2.11)$$

Donde:

f : frecuencia [MHz] $150 \leq f \leq 1500$ MHz.

h_t : altura antena estación base (transmisor) [m]

h_m : altura antena estación móvil (receptor) [m] $1 \leq h_m \leq 10$ m.

d : distancia entre antena transmisora y receptora [Km.] $1 \leq d \leq 20$ Km.

$a(h_m)$: factor de corrección para la altura de antena móvil [dB]

La fórmula de Hata está especialmente concebida para aplicaciones de radiocomunicaciones móviles. De ahí el rango de alturas h_m . Proporciona una pérdida básica de propagación de tipo medio, para cualquier punto de una ciudad, ya que no tiene en cuenta los efectos del entorno del receptor.

La altura efectiva de la antena transmisora es la altura del centro de radiación de la antena sobre el nivel medio del terreno evaluado entre dos distancias de referencias d_1 y d_2 , como se indica a continuación. Si d es la distancia de cobertura se tiene:

$$d_1 = d/4 \quad d_2 = d \quad 1 < d < 8 \text{ Km.}$$

$$d_1 = 3 \quad d_2 = d \quad 8 < d < 15 \text{ Km.}$$

$$d_1 = 3 \quad d_2 = 15 \quad d > 15 \text{ Km.}$$

El nivel medio del terreno es:

$$h_m = \frac{1}{(d_2 - d_1)} \left\{ \sum_{i=k}^{i=h-1} \frac{(c_i + c_{i-1})}{2} (x_{i+1} - x_i) \right\} \quad (2.12)$$

Donde x_i son abscisas del perfil (distancias) y las c_i sus cotas respectivas y $x_k = d_1$, $x_h = d_2$ son las distancias límite.

La altura efectiva de la antena es:

$$h_t = h_0 + c_0 - h_m \quad (2.13)$$

Siendo h_0 la altura sobre el suelo y c_0 la cota del terreno en el pie del mástil de la antena.

En medios urbanos para ciudades con poco desnivel puede tomarse h_t igual a la altura sobre el suelo h_0 .

El término $a(h_m)$ es una corrección que depende de la altura de la antena del móvil. Para una altura $h_m = 1.5$ m., $a(h_m) = 0$. Para otras alturas, $a(h_m)$ depende del tipo de ciudad como sigue:

- Ciudad media-pequeña

$$a(h_m) = (1.1 \log(f) - 0.7) h_m - (1.56 \log(f) - 0.8) \quad (2.14)$$

El error cometido al utilizar esta aproximación aumenta con la frecuencia y es máximo e igual a 1 dB aproximadamente para 1500 MHz. El error mayor se produce para alturas de 4 a 5 m.

- Ciudad grande

$$\begin{aligned} a(h_m) &= 8.29(\log(15.4 \cdot h_m))^2 - 1.1 \rightarrow f \leq 200 \text{MHz} \\ a(h_m) &= 3.2(\log(11.75 \cdot h_m))^2 - 4.97 \rightarrow f \geq 400 \text{MHz} \end{aligned} \quad (2.15)$$

El error es máximo para frecuencias bajas y alturas superiores a 5m donde puede llegar a valer 1 dB.

Si el receptor se encuentra en una zona suburbana, caracterizada por edificaciones de baja altura y calles relativamente anchas, la atenuación es:

$$L_{bs} = L_b - 2[\log(f/28)]^2 - 5.4 \quad (2.16)$$

Por último, si el receptor se encuentra en una zona rural, abierta, sin obstrucciones en su entorno inmediato se tiene:

$$L_{br} = L_b - 4.78(\log(f))^2 + 18.33\log(f) - 40.94 \quad (2.17)$$

La fórmula de Hata no tiene en cuenta la influencia de la ondulación del terreno ni los efectos derivados del grado de urbanización.

2.5.4 Modelo de Ikegami.

Ikegami ha propuesto un modelo para el cálculo de la potencia media en un sistema de radiocomunicaciones móviles en zona urbana cuyas predicciones concuerdan en gran manera con los resultados experimentales y las predicciones empíricas convencionales. El modelo basado en la teoría de rayos y óptica geométrica, supone una estructura ideal de la ciudad con alturas uniformes en los edificios. También tiene en cuenta la orientación de las calles y la altura de la estación móvil, la frecuencia, la altura de la estación base y la distancia.

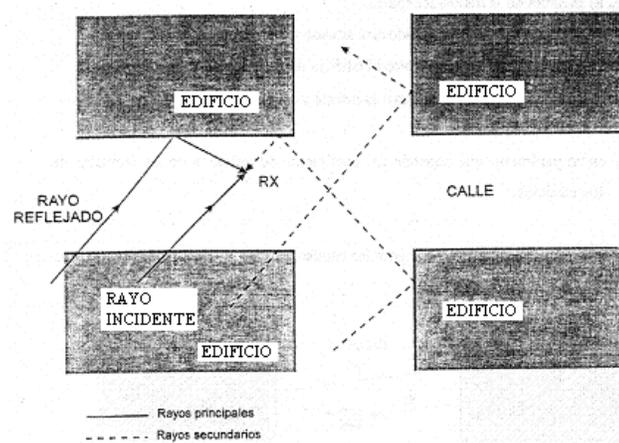


Figura. 2.8 Rayos principales y secundarios.

Para simplificar la aplicación del modelo, se hacen las siguientes suposiciones:

- El tejado del edificio que produce difracción tiene visibilidad directa con la antena transmisora.
- Se desprecia la posible reflexión del suelo.

Con esta hipótesis, el escenario de propagación se transforma en el representado en la **Figura 2.9**, en cuyas partes superior e inferior se ofrecen vistas en plantas y alzado respectivamente.

En esta figura:

E_1 y E_2 son los campos debidos a la onda difractada y reflejada, respectivamente.

H es la altura del edificio en el que se produce la difracción.

H_r es la altura de la antena receptora.

W es la anchura de la calle donde está situado el receptor.

w es la distancia desde el receptor al edificio donde se produce la difracción.

Φ es el ángulo formado por el rayo incidente y la dirección de la calle.

d es la distancia.

l_r es un parámetro que depende del coeficiente de reflexión en las fachadas de los edificios.

Sus valores típicos son 2 y 3.2 para las bandas de VHF y UHF, respectivamente.

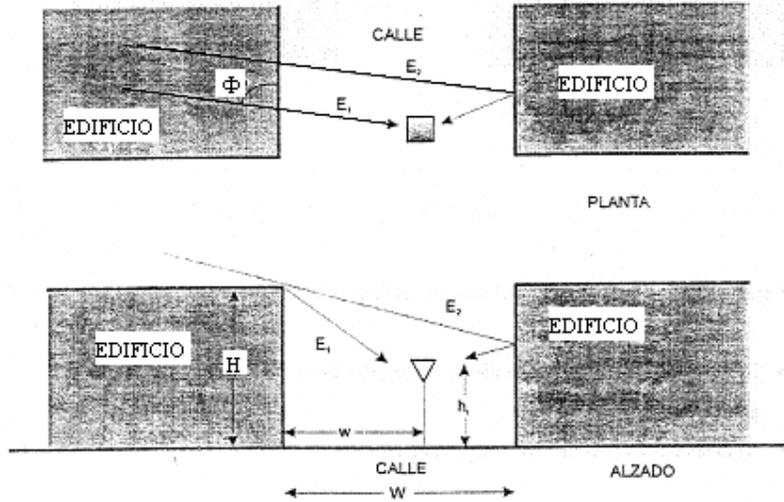


Figura. 2.9 Modelo Ikegami.

Si e_0 representa la intensidad de campo en condiciones de espacio libre, el valor resultante de la intensidad media del campo, es:

$$\bar{e} = \frac{0.225}{\sqrt{2}} e_0 \frac{\sqrt{\lambda \left(w + \frac{2W - w}{l_r^2} \right)}}{(H - h_r) \sqrt{\text{sen} \phi}} \quad (2.18)$$

Como en general, los valores de la intensidad media varían muy poco según el ancho de la calle, la ecuación anterior puede ponerse como:

$$\bar{e} = \frac{0.225}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{3}{l_r^2}} e_0 \frac{\sqrt{\lambda W}}{(H - h_r) \sqrt{\text{sen} \phi}} \quad (2.19)$$

En forma logarítmica resulta:

$$\bar{E} = E_0 + 5.8 + 10 \log \left(1 + \frac{3}{l_r^2} \right) + 10 \log(W) - 20 \log(H - h_r) - 10 \log(f) - 10 \log(\text{sen} \phi) \quad (2.20)$$

Donde H, W y h_r están en metros, la frecuencia f en MHz y E en dBu.

La pérdida básica de propagación en un punto situado a una distancia d(Km.) del transmisor:

$$L_b(\text{dB}) = 2665 + 30 \log(f) + 20 \log(d) - 10 \log \left(1 + \frac{3}{l_r^2} \right) - 10 \log(W) + 20 \log(H - h_r) + 10 \log(\text{sen} \phi) \quad (2.21)$$

El modelo de Ikegami proporciona, en general, buenos resultados de predicción cuando la altura de la antena transmisora es grande, de forma que, prácticamente, en la propagación solo influyen los edificios inmediatos al móvil. Si esto no se cumple y hay algún tipo de interacción con edificios situados en el receptor y el transmisor, las estimaciones del modelo de Ikegami son optimistas⁵.

2.5.5 Modelo Walfish-Bertoni.

Este modelo tiene en cuenta la influencia del conjunto de edificios que se interponen entre el transmisor y el móvil receptor. Reemplazaría de este modo, el principal inconveniente del método de Ikegami. Puede aplicarse para alturas de antena transmisora no muy elevadas, pero por encima de los edificios próximos.

El modelo tiene en cuenta que las ondas principales desde la antena de transmisión T llegan al punto P en el tejado del edificio próximo al móvil, experimentando una pérdida por difracción debido a la proximidad entre el rayo PT y los edificios existentes entre T y P. El conjunto de estos edificios se modela como múltiples pantallas difractoras separadas entre sí una distancia constante igual a b (separación media entre edificios). Desde P los rayos principales que alcanzan el reflector son el PR, difractado en P, y el PQR difractado en P y reflejado en Q.

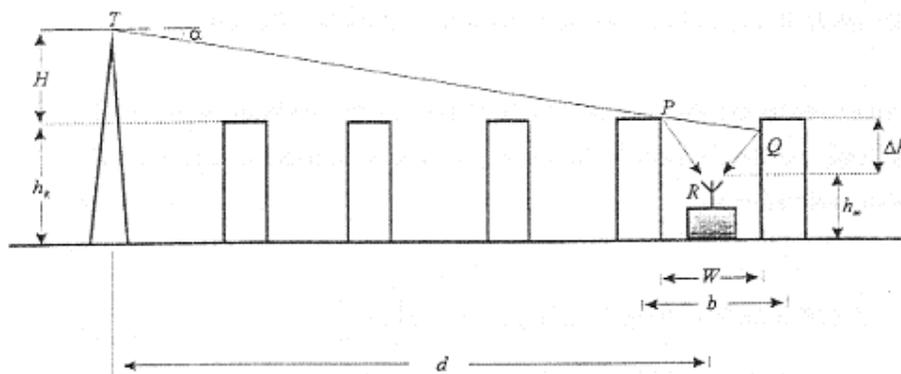


Figura. 2.10. Modelo Walfish- Bertoni.

Los parámetros que se utilizan en la caracterización del entorno urbano, son los siguientes:

⁵Hernando, José; Pérez, Fonlan, *Introduction to Mobile Communications Engineering*, 3ra Edición, Artech House, Boston 1999

- Altura de la antena de transmisión sobre los edificios próximos, H .
- Altura media de los edificios, h_R
- Altura de la antena móvil, h_M
- Separación entre edificios, b
- Distancia, d

Una ventaja de este modelo es que puede aplicarse incluso si no se dispone de parámetros de entorno urbano, ya que se proporciona valores por defecto, aunque, lógicamente, esto da lugar a un aumento en el error de predicción.

El valor de la pérdida básica de propagación L (dB) según este método es:

$$L = 57.1 + A + \log(f) + 18\log(d) - 18\log(H) - 18\log\left(1 - \frac{d^2}{17H}\right) \quad (2.22)$$

Donde el último término tiene en cuenta la curvatura de la tierra y la influencia de los edificios está contenida en el término A (dB) que vale:

$$A = 5\log\left[\left(\frac{b}{2}\right)^2 + (h_r - h_m)^2\right] - 9\log(b) + 20\log\left[\tan^{-1}\left(\frac{2(h_r - h_m)}{b}\right)\right] \quad (2.23)$$

La pérdida total se obtendrá sumando las pérdidas propuestas por el modelo y las pérdidas en el espacio libre, quedando finalmente:

$$L = 89.55 + A + 21\log(f) + 38\log(d) - 18\log(H) - 18\log\left(1 - \frac{d^2}{17H}\right) \quad (2.24)$$

2.5.6 Modelo de Lee.

Lee propuso un modelo de propagación en el año 1982 que fue rápidamente adoptado en EUA debido a que sus parámetros son fácilmente ajustados al ambiente local. El modelo consiste de 2 partes. La primera partes, predicción área-a-área, es usada para predecir las pérdidas sobre terreno plano, sin tener en cuenta la configuración particular del terreno. Obviamente, esta predicción es inadecuada para zonas montañosas. La segunda parte usa la predicción área-a-área como base y desarrolla punto-a-punto para resolver el problema. Su ecuación viene dada por:

$$P_r = 10 \log \left[P_{r_0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\gamma} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-n} \alpha_0 \right] \quad (2.25)$$

Donde:

P_r : intensidad de campo recibida a la distancia r desde el transmisor

P_{r_0} : potencia recibida a 1 milla

r : distancia entre móvil y antena de estación base

r_0 : 1 milla (1,6 Km.)

γ : pendiente pérdidas

f : frecuencia utilizada [MHz].

f_0 : frecuencia nominal (900 MHz)

n : empíricamente determinado, depende de la topología de la zona y la frecuencia utilizada.

$2 \leq n \leq 3$, para áreas abiertas y suburbanas y $f < 450$ MHz se recomienda utilizar $n=2$, para áreas urbanas con $f > 450$ MHz se recomienda $n=3$.

α_0 : factor de corrección.

Lee asume un conjunto de condiciones iniciales, luego el modelo debe ser adaptado para las diferentes condiciones de uso mediante el factor α_0 ; las condiciones nominales del modelo son:

Frecuencia: 900 MHz

Altura antenas estación base: 30.48 mts

Potencia del transmisor: 10 Watt

Ganancia antena estación base: 8.15 dBi

Altura antena del móvil: 3 mts

Ganancia antena del móvil: 2.15 dBi

Factor de corrección:

$$\alpha_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{\text{Altura.antena.estación.base(mts)}}{30.48} \right)^2$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{\text{Altura.antena.estación.móvil(mts)}}{3} \right)^2$$

$$\alpha_3 = \frac{\text{Potencia.transmitida(Watt)}}{10}$$

$$\alpha_4 = \frac{\text{Ganancia.antena.estación.base.respecto.al.radiador.isotrópico}}{6.53}$$

$$\alpha_5 = \frac{\text{Ganancia.antena.estación.móvil.respecto.al.radiador.isotrópico}}{1.64}$$

y donde v es un dato determinado empíricamente y especificado como:

$v = 1$ para altura antena móvil < 3 mts.

$v = 2$ para altura antena móvil > 10 mts.

En la **Tabla 2.1** se pueden ver algunos de los valores empíricamente calculados para P_{r0} y γ :

Tipo de zona	P_{r0} [dBm]	γ
Área Rural	-57.0	4.03
Forestal o parque	-57.0	4.45
Área Residencial	-57.0	4.70
Área Suburbana	-59.2	4.73
Área Urbana (altura edificios: hasta 4 pisos)	-61.5	3.54
Área Urbana Densa (altura edificios: más de 6 pisos)	-61.5	5.69
Espacio Libre (modelo Lee)	-45.0	2.00
Tokio (Urbano)	-84.0	3.05

Tabla. 2.1. Parámetros del modelo de Lee.

Para calcular la atenuación se debe utilizar:

$$L_L \text{ (dBm)} = P_t \text{ (dBm)} - P_r \text{ (dBm)} \quad (2.26)$$

Donde: P_t es la potencia transmitida

Utilizando los valores de la Tabla 2.1 y las ecuaciones anteriores se pueden escribir las expresiones de los modelos para diferentes ambientes:

$$L_L = \begin{cases} 97 + 40.3 * \log\left(\frac{r}{1.6}\right) + 10 * n * \log\left(\frac{f}{900}\right) - \alpha_0 & \text{Rural} \\ 97 + 44.5 * \log\left(\frac{r}{1.6}\right) + 10 * n * \log\left(\frac{f}{900}\right) - \alpha_0 & \text{Parque} \\ 97 + 47.0 * \log\left(\frac{r}{1.6}\right) + 10 * n * \log\left(\frac{f}{900}\right) - \alpha_0 & \text{Residencial} \\ 99.2 + 47.3 * \log\left(\frac{r}{1.6}\right) + 10 * n * \log\left(\frac{f}{900}\right) - \alpha_0 & \text{Suburbana} \\ 101.5 + 35.5 * \log\left(\frac{r}{1.6}\right) + 10 * n * \log\left(\frac{f}{900}\right) - \alpha_0 & \text{Urbana} \\ 101.5 + 56.9 * \log\left(\frac{r}{1.6}\right) + 10 * n * \log\left(\frac{f}{900}\right) - \alpha_0 & \text{Urbana densa} \\ 85 + 20.0 * \log\left(\frac{r}{1.6}\right) + 10 * n * \log\left(\frac{f}{900}\right) - \alpha_0 & \text{Espacio libre} \\ 124 + 30.5 * \log\left(\frac{r}{1.6}\right) + 10 * n * \log\left(\frac{f}{900}\right) - \alpha_0 & \text{Tokyo} \end{cases}$$

2.5.7 Modelo Sakagami-Kuboi.

El modelo SK ha sido desarrollado en Japón para su aplicación a entornos urbanos. Requiere información muy detallada del entorno móvil y tiene validez para las frecuencias de 900 y 1800 Mhz. La concordancia con resultados de mediciones es muy buena.

Según el modelo la pérdida básica de propagación se expresa mediante:

$$L_b = 100 - 7.1 \log(W) + 0.023\phi + 1.4 \log(h_s) + 6.1 \log \langle H \rangle - \left\{ 24.37 - 3.7 \left(\frac{H}{h_{bo}} \right)^2 \right\} \log(h_b) + \quad (2.27)$$

$$+ (43.2 - 3.1 \log(h_b)) \log(d) + 20 \log(f) + \exp\{13(\log(f) - 3.23)\}$$

Donde:

W: Anchura de la calle donde está el móvil (5 a 50m)

Φ : Angulo entre la dirección móvil-base y el eje de la calle (0-90°).

hs: Altura de los edificios próximos al móvil (5-80m.).

$\langle H \rangle$: Altura media de los edificios alrededor del punto de recepción (5-50m).

hb: Altura de la antena de estación base respecto del punto de recepción (20-100m.).

hbo: Altura de la antena de estación base sobre el suelo(m.)

H: Altura media de los edificios alrededor de la estación base ($H \leq hbo$).

F: Frecuencia (450-2200MHz).

El gran número de datos que requiere este modelo solo lo hace útil cuando se dispone de mapas urbanos digitalizados de donde puedan evaluarse.

2.5.8 Modelos COST-231.

El grupo COST (Cooperativa Europea para investigación científica técnica) introdujo modificaciones al modelo de Hata para extender su rango de uso a las frecuencias entre 1500 MHz y 2000 MHz esto se debió al advenimiento de PCS en la banda de 1900 MHz (USA) y la asignación de bandas en 1800 MHz para GSM (Europa) donde el modelo de Hata no puede aplicarse. También se lo conoce como “COST-HATA-MODEL” y quedó plasmado en el COST-231 Final Report: “Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems”.

Además propuso mejorar las predicciones que se obtiene por el método Walfish-Ikegami obteniendo un nuevo método que se basa en los diferentes estudios realizados por dicho grupo y que resulta aplicable en diferentes entornos.

2.5.8.1 Modelo COST-Walfish-Ikegami.

El modelo propuesto es una combinación de los de Walfish e Ikegami y está basado en los diferentes estudios llevados a cabo por miembros del grupo COST-231. Resulta aplicable a los siguientes entornos.

- Celdas grandes y pequeñas: La antena de la estación base se sitúa por encima de los tejados de los edificios, en cuyo caso las pérdidas de propagación están determinadas principalmente por la difracción y la dispersión en los tejados de los edificios cercanos al móvil.
- Microceldas: La estación base está situada por debajo de los tejados de los edificios, estando entonces determinada la propagación por la difracción y la dispersión alrededor de los edificios, es decir, los rayos principales se propagan en las calles de modo similar a como lo harían en una guía de onda.

En el primer caso la geometría del modelo COST-231 es la misma que la de Walfish – Bertoni, con la diferencia de que intervienen además la anchura de la calle W y el ángulo de la calle con la dirección de propagación ϕ , como en el modelo de Ikegami.

La atenuación que propone el método consta de tres términos:

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad (2.28)$$

El primer término representa la pérdida en espacio libre L_0 , el segundo las pérdidas por difracción y dispersión del tejado en la calle L_{rts} y el tercero la pérdida por difracción multi-pantalla L_{msd} , todas ellas en dB.

Las pérdidas por difracción y dispersión del tejado a la calle vienen dadas por:

$$L_{rts} = -16.9 - 10\log(W) + 10\log(f) + 20\log(\Delta h_R) + L_{ori} \quad (2.29)$$

Donde $\Delta h_R = h_R - h_m$ y L_{ori} son las pérdidas debidas a la orientación de la calle:

$$\begin{aligned} -10 + 0.3571\phi &\rightarrow 0 \leq \phi \leq 35^\circ \\ L_{ori} = 2.5 + 0.075(\phi - 35) &\rightarrow 35^\circ \leq \phi \leq 55^\circ \\ 4.0.114(\phi - 55) &\rightarrow 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{aligned} \quad (2.30)$$

El valor de L_{ori} tiene en cuenta el ángulo ϕ entre el rayo directo y el eje de la calle. Si el valor L_{rts} es menor de cero se toma $L_{rts} = 0$.

Las pérdidas multi-pantalla, que al igual que las anteriores se hacen cero cuando son negativas, se obtienen a partir de la siguiente ecuación:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log(d) + k_f \log(f) - 9\log(b) \quad (2.31)$$

Los parámetros que intervienen en esta expresión se calculan como sigue:

$$L_{bsh} = -18\log(1 + \Delta h_B) \rightarrow \Delta h_B = h_B - h_R$$

Si $\Delta h_B < 0$, $L_{bsh} = 0$

En cuanto a las constantes k_s y k_d se pueden obtener a partir de:

$$\begin{aligned}
 & 54 \rightarrow \Delta h_B \geq 0 \\
 k_a = & 54 - 0.8\Delta h_B \rightarrow \Delta h_B < 0, y.d \geq 0.5 \\
 & 54 - 1.6\Delta h_B d \rightarrow \Delta h_B < 0, y.d < 0.5
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

$$\begin{aligned}
 & 18 \rightarrow \Delta h_B \geq 0 \\
 k_d = & 18 - 15 \frac{\Delta h_B}{h_R} \rightarrow \Delta h_B < 0
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

Para la constante k_f se hace la distinción de ciudades grandes y medianas, así en el caso de ciudades de tamaño medio y centros suburbanos con densidad moderada de vegetación vale:

$$k_f = -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \tag{2.34}$$

Mientras que para grandes centros metropolitanos el valor k_f es:

$$k_f = -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \tag{2.35}$$

En estas ecuaciones el término k_a representa el incremento de pérdidas de propagación en el caso en que las antenas de las estaciones base estén por debajo de los tejados de los edificios adyacentes y los coeficientes k_d y k_f ajustan la dependencia de la difracción en función de la distancia y la frecuencia.

Si los datos de la estructura de los edificios y calles son desconocidos se recomienda los valores siguientes:

- Altura de los edificios $h_R = 3$.
- Separación entre edificios $b = 20-50$ m.
- Anchura de la calle $W=b/2$.
- Orientación de la calle con respecto al rayo directo de propagación $\varphi = 90^\circ$.

El modelo de propagación COST-231 se ha validado para frecuencias en las bandas de 900 a 1800 MHz. Y para distancias desde 10 m. a 3 Km. En cuanto a la exactitud de sus predicciones puede indicarse que es aceptable cuando $h_B > h_R$. En cambio si $h_B \gg h_R$ el error de predicción es mayor ya que aparecen modos de propagación no considerados en el

modelo como son el efecto de guía de onda por las calles y la difracción en las esquinas. Asimismo deben utilizarse con precaución los resultados del método cuando $h_B < h_R$ ya que no se ha dispuesto de suficientes mediciones para validarlos. Por último los parámetros b , W y ϕ del modelo no presentan un significado físico totalmente claro cuando se trata de microceldas, por tanto el error para este tipo de celdas puede ser bastante importante.

Cuando desde la antena de la estación base hay visibilidad a lo largo de una calle, la propagación tiene lugar según un modo tipo guía de onda. El método COST-231 proporciona la siguiente expresión de la pérdida básica de propagación para estos casos:

$$L_b = 42.6 + 26 \log(d) + 20 \log(f) \rightarrow d \geq 20m. \quad (2.36)$$

La constante 42.6 se ha fijado de forma que L_b sea igual a la pérdida en el espacio libre para $d = 20m$. (d , Km. Y f , MHz).

2.5.8.2 Modelo COST-Hata.

La ecuación de atenuación para las frecuencias hasta 1500 MHz adoptada por COST son las del modelo de Hata, y la modificación introducida para las frecuencias de 1500 MHz a 2000 MHz es:

$$L_c = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_B) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log(h_B)) \log(d) + C_m \quad (2.37)$$

Donde:

f : frecuencia [MHz]

h_B : altura antena estación base (transmisor) [m]

h_m : altura antena estación móvil (receptor) [m]

d : distancia entre antena transmisora y receptora [Km.]

$a(h_m)$ es la altura de la estación móvil.

$C_m = 0dB \rightarrow$ para ciudades tamaño medio y centros suburbanos con densidad media de árboles

$C_m = 3dB \rightarrow$ para centros metropolitanos.

El dominio de uso de éste modelo es:

Frecuencia f (150-2000 MHz)

Distancia d (1-20km)

Altura antena estación base h_B (30-200m)

Altura antena estación móvil h_m (1-10m)

2.6 MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA MICROCELDAS

Los modelos de propagación en microceldas son especialmente importantes en las últimas implementaciones de los sistemas celulares comerciales. Actualmente, según la densidad de tráfico aumenta en las grandes urbes, y según la necesidad de obtener móviles pequeños (asociados a una potencia de transmisión baja) se hace imprescindible, se crea celdas de superficie cada vez mas pequeñas, como las del estándar DCS 1800 MHz (entorno PCN-PCS) o incluso en entornos de tercera generación, para atender a estas demandas de tráficos crecientes en entornos suburbanos densos.

2.6.1 Modelos LOS.

Dentro de los modelos LOS se comentarán tres modelos basados en la expresión $I(d) = k.d^n$ para medios heterogéneos en los que el valor de n varía en los puntos de cambio de medio.

2.6.1.1 Método 1.

Este método se formula como sigue:

$$L_1(d) = L_0 + 10n_1 \log(d) \text{ dB}; \quad d \leq d_p \quad (2.38)$$

$$L_2(d) = L_0 + 10n_1 \log(d_p) + 10n_2 \log\left(\frac{d}{d_p}\right) \text{ dB}; \quad d > d_p \quad (2.39)$$

Donde:

$$d_p = \frac{4h_t h_m}{\lambda}; \quad h_t = \text{altura del transmisor}; \quad h_m = \text{altura móvil.}$$

Estas expresiones son válidas para $d < 1500$ m. en condiciones LOS.

2.6.1.2 Método 2.

Este método ha sido propuesto por la universidad de Lund en Suecia, en el marco COST-231, combinando las atenuaciones L1 y L2 para que no existan transiciones bruscas en las discontinuidades:

$$l(d) = k \left[l_1^4(d) + l_2^4(d) \right]^{1/4}; \quad k = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^4; \quad \begin{matrix} l_1(d) = d^{n_1} \\ l_2(d) = d_p^{-n_2+n_1} d^{n_2} \end{matrix} \quad (2.40)$$

2.6.1.3 Método 3.

El grupo UIT-R 8/1 que estudia el IMT-2000 (sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación dentro del UIT) ha propuesto un tercer método con tres secciones, en las que las expresiones en dB son:

$$\begin{aligned}
 d < d_p / 2 &\rightarrow L(d) = 40 + 25 \log(d) \\
 d_p / 2 \leq d \leq 4d_p &\rightarrow L(d) = 40 + 25 \log(d_p / 2) + 40 \log\left(\frac{d}{4d_p}\right) \\
 d \geq 4d_p &\rightarrow 40 + 25 \log(d_p / 2) + 40 \log(4d_p) + 60 \log\left(\frac{d}{4d_p}\right)
 \end{aligned} \tag{2.41}$$

2.6.2 Modelos NLOS.

El aspecto típico del problema planteado por las líneas de no visión directa es el de doblar una esquina y perder la LOS. Se lo representa en la siguiente figura:

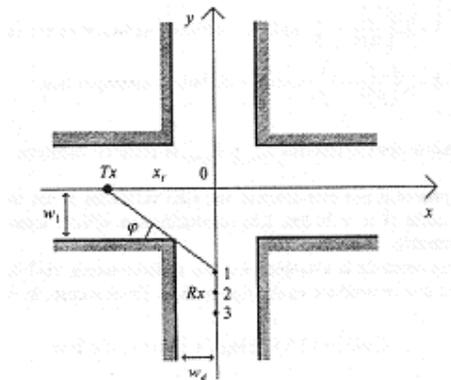


Figura. 2.11. Modelo cálculo pérdidas propagación NLOS.

2.6.2.1 Modelo COST 231-Lund.

Para la estimación de la atenuación se considera en el modelo COST 231-Lund la atenuación de propagación total como la suma de las siguientes componentes:

- Atenuación desde el transmisor hasta el origen de ordenadas, considerando el tramo x_t como modelo LOS.
- Atenuación adicional para distancia del origen de coordenadas hasta el receptor correspondiente a los puntos 1, 2, o 3:

$$L(y) = [u(y_1) - u(y_2)]f(y_2) \frac{\log y - \log y_1}{\log y_2 - \log y_1} + u(y_2)f(y) \quad (2.42)$$

$$u(y) = \begin{cases} 0; y < 0 \\ 1; y > 0 \end{cases}; \quad \begin{cases} y_1 = 10.7\varphi + 0.22w_d + 2.99 \\ y_2 = 0.62w_d + 4.9 \end{cases} \quad (2.43)$$

$$f(y) = 10 \log \left(\frac{y}{y_0} \right)^n; \quad y_0 = 8.92\varphi + 1.7; n = 2.75 - 1.13e^{-23.4-\varphi}; \varphi(\text{rad}), w(m)$$

También se ha propuesto un modelo usando la teoría geométrica de difracción GTD, también citado en el COST-231, y que usa difracción en la esquina por cuña de 90°.

2.6.2.2 Modelo Dresde.

En la universidad de Dresde, se ha propuesto un modelo para la NLOS, citado en el COST 231 y que utiliza la GTD. El modelo considera que la propagación en la zona NLOS se produce por difracción en la esquina E que se trata, a efectos de GTD, como una cuña con ángulo de 90°. (Figura 2.13)

Se considera que los coeficientes de reflexión en las paredes para las ondas incidentes en ellas con polarización horizontal son iguales a -1.

El valor de la atenuación en exceso por difracción en la cuña es:

$$L_c = 20.73 + 10 \log[s's'(s'+s)] - 10 \log \lambda - 20 \log \left[\frac{1}{0.5 + \cos[(\varphi - \varphi')/1.5]} - \frac{1}{0.5 + \cos[(\varphi + \varphi')/1.5]} \right] \quad (2.44)$$

La atenuación total será:

$$L_t = L_{bf} + L_{ex} = 20 \log \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) + L_c \quad (2.45)$$

Introduciendo L_c , queda:

$$L_c = 42.71 + 10 \log[s's'(s'+s)] - 30 \log \lambda - 20 \log \left[\frac{1}{0.5 + \cos[(\varphi - \varphi')/1.5]} - \frac{1}{0.5 + \cos[(\varphi + \varphi')/1.5]} \right] \quad (2.46)$$

2.7 MODELOS DE CANALES MULTITRAYECTO

En aplicaciones de banda estrecha una caracterización de desvanecimiento rápido producido por la suma incoherente de distintos ecos es suficiente para describir la propagación multitrayecto, sin embargo en aplicaciones de banda ancha como las

correspondientes a los modernos sistemas de comunicaciones móviles digitales es necesario conocer otros efectos derivados de la propagación multitrayecto y el desplazamiento del móvil. En este caso se habla de caracterización en banda ancha de los canales multitrayecto⁶.

Cuando se transmite una señal llegan al receptor una componente directa (si hay visibilidad directa) y múltiples ecos con amplitudes, fases y tiempos de llegada aleatorios. Centrándonos en la variable tiempo, a este efecto se le denomina dispersión temporal.

Sean t_i y t_o los tiempos de propagación del eco i -ésimo y del eco que llega en primer lugar. A la diferencia $t_i - t_o$, se le denomina exceso de retardo (delay excess) del eco i -ésimo. A partir del conjunto de valores $\{t_i - t_o\}$ del exceso de retardo se obtiene una característica, calificativa de los canales multitrayecto, llamada dispersión del retardo (delay spread) cuyo valor depende del entorno de propagación (rural, urbano más o menos denso, etc.). Una diferencia de recorridos de 300 m. corresponde a un exceso de retardo de 1 μ s. Como en los medios urbanos, el multitrayecto se genera en estructuras relativamente próximas al móvil, es normal encontrar dispersores de retardo de 0.5 a 1.5 μ s. En medios rurales los valores aumentan debidos a ecos producidos por reflexiones en obstáculos alejados (montañas).

La dispersión temporal produce, en el dominio del tiempo, interferencia entre símbolos ISI y en el dominio de la frecuencia, para sistemas de banda ancha, desvanecimiento selectivo en frecuencia (FSF: Frequency Selective Fading). Como consecuencia la señal recibida experimenta una distorsión.

La caracterización del FSF de un canal se realiza mediante un parámetro denominado ancho de banda de coherencia del canal, BC , que mide el grado de correlación entre dos componentes espectrales de la señal transmitida separadas BC . Si el ancho de banda de señal transmitida BT , cuando $BT \ll BC$ las componentes espectrales de señales están muy correlacionadas y se desvanecen a la vez. Se dice entonces que el desvanecimiento es plano. Si $BT < BC$ habrá componentes que se desvanezcan cuando otras no lo hacen y entonces el desvanecimiento es selectivo.

⁶ Sendin, Alberto, *Fundamentos de los Sistemas de Comunicaciones Móviles*, 2da Edición, McGraw Hill, España 2004

Se comentan a continuación los efectos debidos a la variabilidad del canal derivada de la movilidad de los terminales.

Al desplazarse un vehículo a través del patrón de ondas estacionarias generado por la propagación multitrayecto, la amplitud de la tensión recibida varía en función del tiempo con un ritmo que depende de la velocidad, de forma que el patrón espacial se transforma en otro temporal.

Como consecuencia reproducen dos efectos íntimamente ligados entre sí. Por una parte, el desvanecimiento espacial se transforma en desvanecimiento selectivo en tiempo (TSF: Time Selecting Fading) y por otra, las variaciones temporales de la amplitud recibida se traducen en una dispersión de frecuencia, denominada dispersión o desplazamiento Doppler (Doppler Shift) que es función de la velocidad y dirección del movimiento del vehículo y de la frecuencia, y con valores máximos iguales a $\pm v/\lambda$. El desplazamiento Doppler produce variaciones de las frecuencias espectrales de la señal y, en consecuencia, distorsión.

Cada componente de multitrayecto experimenta un desplazamiento Doppler f_{di} . A partir del conjunto de los desplazamientos se obtiene un parámetro calificador de la movilidad llamado dispersión Doppler (Doppler Spread).

Como consecuencia del TSF, elementos sucesivos de señal transmitidos en tiempos diferentes, como sucede, por ejemplo, en TDMA, van en distintos canales, por lo que al recibirse la totalidad de la señal habrá también distorsión. Lo mismo sucede si retransmite una señal larga. Puede ocurrir que el prólogo de la señal vea un canal diferente del que contempla el epílogo.

Para caracterizar el TSF se establece un parámetro llamado tiempo de coherencia del canal, T_c , tal que los dos elementos de señal separados entre sí un tiempo inferior a T_c están correlacionados y ven el mismo canal. Si su separación temporal es mayor a T_c tendrán diferente correlación y afectarán el TSF.

En resumen, la caracterización en banda ancha de canales multitrayecto se realiza mediante cuatro parámetros básicos:

- Para describir la dispersión temporal: Dispersión de retardo y ancho de banda de coherencia.
- Para describir la dispersión en frecuencia: Dispersión Doppler y tiempo de coherencia.

En el caso de sistemas móviles analógicos de banda estrecha, el desvanecimiento multitrayecto es plano (no selectivo) y puede producir microcortes de la señal sobre todo cuando el móvil circula despacio. La distorsión no suele ser muy importante.

Para sistemas móviles digitales, con ancho de banda de algunos cientos de KHz, la distorsión y la ISI producen una tasa elevada de errores en los bits (BER) la cual no puede reducirse aumentando la potencia de transmisión. A este valor umbral de la BER, se le llama BER irreducible (I-BER).

La compensación de los efectos del multitrayecto y, por tanto, la mejora de la I-BER, se realiza mediante varios tipos de contramedidas, como son: empleo de diversidad de recepción, utilización de saltos de frecuencias, empleo de ecualizaciones digitales en el receptor y uso de códigos correctores/detectores de errores con entrelazado.

Un ecualizador debe efectuar la compensación de la interferencia entre símbolos en tiempo real. Además, debe ser adaptable, es decir, necesita conocer las características del canal que debe compensar y autoajustarse en consecuencia. Asimismo, ya que por el desplazamiento Doppler esas características varían con el tiempo, el ecualizador debe actualizar su ajuste periódicamente.

En consecuencia, los ecualizadores se caracterizan por su tamaño o capacidad, que dependen del retardo máximo ecualizable, y su velocidad de ajuste que es función del desplazamiento Doppler máximo del canal. Estas magnitudes influyen en la complejidad, velocidad de respuesta y coste del ecualizador.

Con el fin de alcanzar un compromiso razonable entre estos parámetros, se limita en los sistemas reales el valor máximo del retardo ecualizable.

Cada microsegundo de retardo entre dos ecos equivale a una diferencia de recorridos de 300 m. En medios urbanos los valores máximos del retardo suelen ser de 2 a 5 μ s (diferencias de recorridos de 600 m. a 1500 m.). En GSM el retardo máximo ecualizable es de 16 μ s y la frecuencia Doppler de 210 Hz.

En sistemas de gran ancho de banda, como los utilizados en CDMA se aprovecha el poder de resolución del receptor para identificar y separa ecos, enfazarlos y sumarlos de forma coherente, con lo cual la dispersión temporal pasa de ser perjudicial a ser beneficiosa. Se utilizan para ello estructuras de receptores especiales (receptores Rake).

Para visualizar y estudiar los parámetros de los canales multitrayecto así como para validar modelos teóricos y de simulación se realizan transmisiones de prueba, con señales específicamente elegidas. En recepción se realizan ciertos procesamientos para poner relieve y representar esos efectos. A esta técnica se le denomina sondeo del canal y los equipos utilizados se llaman sondeadores.

Un sondeador básicamente consta de un transmisor de onda continua y de amplitud constante que, junto con un receptor de banda estrecha equipado con un detector de envolvente, permite obtener la amplitud de la señal multitrayecto.

Los sondeadores de banda ancha consisten, en esencia, en un transmisor modulado por una secuencia pseudoaleatoria y un receptor de banda ancha que dispone de un detector de correlación. La capacidad de resolución de ecos es proporcional al ancho de banda del receptor. Supuesta ésta lo suficientemente grande como para detectar todos los ecos significativos, la respuesta del sondeador sería equivalente a la que se obtendría transmitido un impulso en banda base y detectando ecos. Se pone así de manifiesto la dispersión temporal del medio de propagación, en la **Figura 2.12**, se muestra un ejemplo en el que se aprecian el impulso transmitido y cinco ecos con diferentes amplitudes y tiempos de llegada.

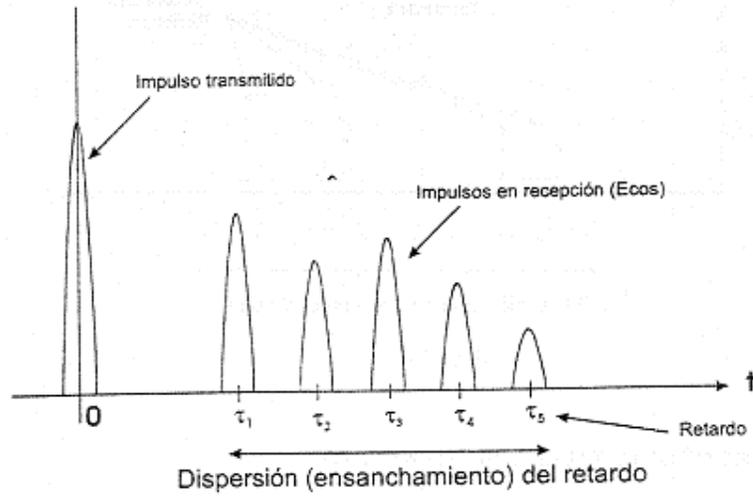


Figura. 2.12. Dispersión temporal del medio de transmisión.

La transmisión de una onda continua de frecuencia f_c durante un tiempo suficientemente largo equivale al sondeo del canal con un impulso de frecuencia: $\delta(f - f_c)$

Si se dispone de un receptor móvil con capacidad de resolución de frecuencia adecuada, se detectan múltiples componentes de frecuencias $f_c \pm f_{di}$ siendo f_{di} el desplazamiento Doppler para la componente correspondiente al trayecto i -ésimo. Se observa así la dispersión en frecuencia del medio de propagación, de la que se representa un ejemplo en la **Figura 2.13**.

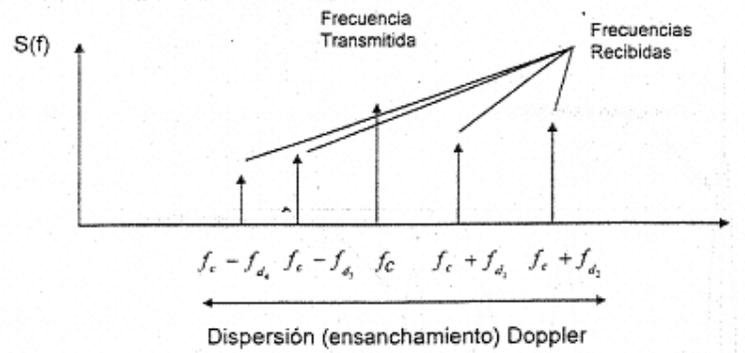


Figura. 2.13. Dispersión en frecuencia del medio de transmisión.

2.8 TIPOS DE MODELOS

Para analizar e investigar el comportamiento y la calidad de las distintas técnicas de multiacceso y modulación digital en condiciones de propagación multitrayecto se han desarrollado diferentes modelos de estos canales, que podemos clasificar como sigue:

- Por su naturaleza :
 - Modelos matemáticos. Basados en la representación de las ondas por rayos y su interacción con las estructuras dispersoras. Se les llama modelos de dispersores y se utilizan para estudios teóricos y para la simulación lógica.
 - Modelos físicos. Son aquellos en que los fenómenos de multitrayecto se materializan mediante circuitos electrónicos. Se utilizan para la simulación física.

- Por su variabilidad:
 - Modelos estáticos, en los que el receptor es fijo.
 - Modelos dinámicos con receptor móvil.

- Por el tipo de tratamiento:
 - Modelos determinísticos, que se caracterizan por manejar estructuras de dispersores no aleatorias.
 - Modelos aleatorios, que caracterizan al canal como un proceso aleatorio multidimensional.

Para el desarrollo de los modelos se tiene en cuenta que por los canales de radiocomunicaciones se transmiten portadoras moduladas que son de tipo pasabanda. Sin embargo el tratamiento matemático es más conveniente realizarlo con sus equivalentes de pasa bajo. Recordemos que si $s(t)$ y $r(t)$ son, respectivamente, las señales pasabanda transmitidas al canal y recibida desde el mismo y si llamamos $x(t)$ y $y(t)$, respectivamente a sus representaciones pasabajo equivalente, las relaciones entre estas señales son:

$$\begin{aligned} s(t) &= \text{Re}[x(t) \cdot \exp(jw_c t)] \\ r(t) &= \text{Re}[y(t) \cdot \exp(jw_c t)] \end{aligned} \quad (2.47)$$

Donde $w_c = 2\pi fc$, siendo fc la frecuencia portadora de la modulación.

En la **Figura 2.14** se ilustra el convenio de notación de señales que se han tomado para continuar.

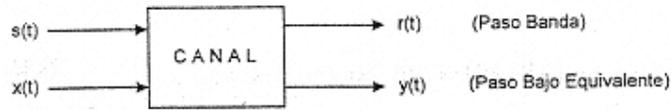


Figura. 2.14. Notación de señales.

2.9 MODELO DETERMINÍSTICO DE DISPERSORES

Se puede iniciar el estudio de caracterización de un canal móvil multitrayecto siguiendo un modelo conceptualmente muy simple que, aunque teórico proporciona una visión física, intuitiva y didáctica de las complejas características de los canales.

El modelo utiliza la teoría de rayos y supone que la señal que llega al receptor es la suma de N rayos que, partiendo del transmisor, inciden, al menos, en un elemento dispersor y alcanzan el receptor. Se supone que el estudio se realiza en un intervalo elemental $0 \leq t \leq \Delta t$ en el que la estructura de dispersores es invariante y la variación de la señal modulada $x(t)$ es muy pequeña. Asimismo, se considera una emisión omnidireccional. La señal pasabanda transmitida es $s(t)$, siendo $x(t)$ en paso bajo equivalente y f_c la frecuencia portadora de forma que:

$$s(t) = \text{Re}[x(t) \cdot \exp(j\omega_c t)] \quad (2.48)$$

La contribución del dispersor i -ésimo de la señal recibida la ponemos como:

$$r_i(t) = A\rho_i(t) \text{Re}\{x[t - \zeta_i(t)] \exp j\omega_c [t - \zeta_i(t)]\} \quad (2.49)$$

En el pequeño intervalo de tiempo en que trabajamos podemos suponer que ρ_i es constante y que la función de retardo $\zeta_i(t)$ tiene una variación lineal:

$$\zeta_i(t) = \zeta_i + \dot{\zeta}_i t \quad (2.50)$$

Luego

$$r_i(t) = A\rho_i \text{Re}\{x[t - \zeta_i - \dot{\zeta}_i t] \exp j\omega_c [t - \zeta_i - \dot{\zeta}_i t]\} \quad (2.51)$$

Si BW_x es el ancho de banda de $x(t)$ y Δt es lo suficientemente pequeño para $\dot{\zeta}_i \Delta t \ll 1/BW_x$, se puede hacer la aproximación:

$$x(t - \zeta_i - \dot{\zeta}_i t) \approx x(t - \zeta_i) \quad (2.52)$$

Sin embargo, no puede hacerse lo mismo con la fase ya que una pequeña variación de ζ_i puede producir grandes cambios de fase. Por ejemplo, para $\dot{\zeta}_i t = \pi / \omega_c$ el término de fase queda:

$$j\omega_c \left[t - \zeta_i - \frac{\pi}{\omega_c} \right] = j\pi [2f_c(t - \zeta_i) - 1] \quad (2.53)$$

Si $t - \zeta_i = 1/f_c$ la variación de fase es de π radianes. Para $f_c = 900\text{MHz}$, esto corresponde a una variación temporal de tan solo 0.556 ns.

Como ζ_i no se conoce con exactitud, lo ponemos en la forma:

$$\zeta_i = \tau_i + \frac{\theta_i}{\omega_c} \quad (2.54)$$

Donde τ_i será un valor aproximado de ζ_i y θ_i una variable que describe las variaciones en torno a él con la condición $-\pi \leq \theta \leq \pi$.

Con estos convenios tenemos:

$$r_i(t) = A\rho_i \text{Re}\{x(t - \tau_i) \exp j\omega_c(t - \tau_i - \theta_i / \omega_c - \dot{\zeta}_i t)\} \quad (2.55)$$

Donde:

$$\dot{\zeta}_i = \frac{d_i(\Delta t) - d_i(0)}{c\Delta t} \quad (2.56)$$

Siendo c la velocidad de propagación y d_i las distancias del transmisor al móvil en los puntos inicial y final de estudio (**Figura 2.15**).

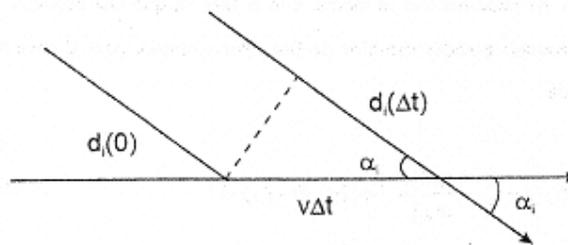


Figura. 2.15. Puntos inicial y final.

De la **Figura 2.15** se desprende:

$$d_i(\Delta t) - d_i(0) = v\Delta t \cos \alpha_i \quad (2.57)$$

Siendo v la velocidad del móvil que suponemos constante en el intervalo y α_i el ángulo formado por los vectores velocidad del móvil y dirección del rayo, con lo que queda:

$$\zeta_i = \frac{v}{c} \cos \alpha_i, \text{ luego}$$

$$\omega_c \zeta_i = 2\pi f_c \frac{v}{c} \cos \alpha_i = 2\pi \frac{v}{\lambda_c} \cos \alpha_i = -2\pi \vartheta_i = -\omega_{di} \quad (2.58)$$

Donde hemos denotado con ω_{di} la pulsación Doppler debida al dispersor i -ésimo.

La señal recibida queda entonces:

$$r_i(t) = A\rho_i \operatorname{Re}\{x(t - \tau_i) \exp j[(\omega_c + \omega_{di})t - \omega_c \tau_i - \theta_i]\} \quad (2.59)$$

La señal total será la suma de todas las componentes individuales:

$$r(t) = A \operatorname{Re}\left\{\sum_i \rho_i x(t - \tau_i) \exp j[(\omega_c + \omega_{di})t - \omega_c \tau_i - \theta_i]\right\} \quad (2.60)$$

Y la expresión pasabajo equivalente será:

$$y(t) = A \sum_i \rho_i x(t - \tau_i) \exp j(\omega_{di}t - \omega_c \tau_i - \theta_i) \quad (2.61)$$

En el caso particular en que $s(t)$ sea un fador :

$$s(t) = A \operatorname{Re}[\exp(j\omega_c t)] \quad (2.62)$$

La señal recibida será:

$$r(t) = A \operatorname{Re}\left\{\sum_i \rho_i \exp j[(\omega_c + \omega_{di})t - \omega_c \tau_i - \theta_i]\right\} \quad (2.63)$$

En estas expresiones quedan patentes los cuatro parámetros que caracterizan a las componentes de multitrayecto; amplitud ρ_i , frecuencia Doppler ω_{di} , retardo τ_i y desfaseamiento θ_i . En general, estos parámetros serán variables aleatorias por lo que $r(t)$ será un proceso estocástico⁷.

En los modelos determinísticos, asimilando ρ_i al valor eficaz de la tensión de cada eco, considerando $A = 1$ y una resistencia de 1Ω , la potencia p_i del eco i -ésimo es:

$$p_i = \rho_i^2$$

⁷Hernando, José; Pérez, Fonlan, *Introduction to Mobile Communications Engineering*, 3ra Edición, Artech House, Boston 1999

Y se puede obtener los valores de ρ_i a partir de las potencias. Suponiendo que hay una sola interacción (reflexión o dispersión) y que la única pérdida de propagación hasta y desde el elemento dispersor es la de espacio libre, si p_t es la potencia transmitida, las potencias de las componentes de multitrayecto serán:

1. Componente directa.

$$P_{rd} = p_t \frac{1}{4\pi d^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.64)$$

d: distancia transmisor-receptor.

2. Componente de reflexión especular.

$$P_{rr} = p_t \frac{|R|^2}{4\pi(d_1 + d_2)^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.65)$$

d_1 = distancia transmisor-punto de reflexión.

d_2 = distancia punto de reflexión-receptor.

$|R|$ = módulo del coeficiente de reflexión.

3. Componentes de dispersión.

$$P_{rs} = p_t \frac{1}{4\pi d_1^2} \sigma \frac{1}{4\pi d_2^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.66)$$

d_1 = distancia transmisor-dispersor.

d_2 = distancia dispersor-receptor.

2.10 FUNCIONES DEL SISTEMA

Los canales multitrayecto móviles son variables con el tiempo aunque conservan su linealidad, pueden caracterizarse mediante funciones de transferencia y de respuesta impulsiva, de forma similar a como se hace para los canales temporalmente invariantes que se manejan en teoría de la señal.

No obstante aquí hay que destacar los fenómenos de variación temporal y desplazamiento Doppler. Lo cual implica que se necesita manejar cuatro variables: la variación de tiempo (t) que denota la variabilidad tanto en señales transmitida y recibida como del canal, la variable retardo o dispersión temporal (τ), la variable frecuencia (f) propia del espectro de las señales y, por último, la variable desplazamiento Doppler (ν).

Las dos funciones clásicas (respuesta impulsiva y función de transferencia) de los canales invariantes se transforma ahora en cuatro, al combinarse esas funciones con las variables citadas. Se les denomina funciones del sistema o funciones de Bello por ser este autor el primero que propuso y sistematizó su estudio. Para analizar los efectos de los canales multitrayecto mediante funciones del sistema se utilizan representaciones pasabajo equivalente de las señales y las funciones.

Las cuatro funciones básicas de Bello, para un canal ideal determinístico, son las siguientes:

1. Función de respuesta impulsiva variable con el tiempo: IDSF (Input Delay Spread Function): $h(t, \tau)$.
2. Función de transferencia variable con el tiempo: TVTF (Time Variable Transfer Function).

Estas dos funciones son las homólogas de las funciones de respuesta impulsiva y de transferencia, clásica de los canales invariantes.

Las dos funciones adicionales que aparecen como consecuencia del desplazamiento Doppler, son:

3. Función desplazamiento Doppler – retardo: DDSF (Doppler Delay Spread Function).
4. Función de transferencia frecuencia-desplazamiento Doppler: ODSF (Output Doppler Spread Function).

Estas cuatro funciones están relacionadas entre sí mediante transformaciones de Fourier directas (DFT) e inversas (IFT) sobre las diferentes variables de que dependen.

En la **Tabla 2.2** se indica como se pasa de una función a otra. El subíndice de cada abreviatura de la transformación indica la variable sobre la que actúa.

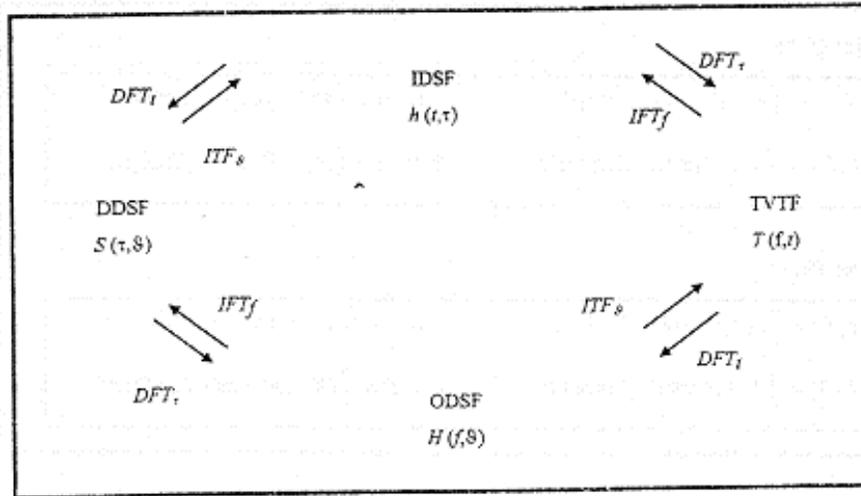


Tabla. 2.2. Relaciones de Fourier entre las funciones de sistema.

Las variables que se corresponden en las transformaciones de Fourier y sus efectos son:

Dispersión temporal (τ) \leftrightarrow Desvanecimiento selectivo en frecuencia (f)

Variabilidad temporal (t) \leftrightarrow Dispersión de frecuencia (ϑ)

En la **Tabla 2.3** se indican expresiones de transformación de Fourier entre estas funciones. Debido a estas relaciones, basta conocer una de las funciones para obtener las demás. Una de las funciones mas utilizadas en la caracterización de los canales multitrayecto es la $S(\tau, \vartheta)$, porque recoge las propiedades de dispersión temporal y desplazamiento Doppler características de estos canales.

Dominios (f, τ)	
$T(f, t) = \int h(\tau, t) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau$	$h(t, \tau) = \int T(f, t) \exp(-j2\pi f\tau) df$
$H(f, \theta) = \int S(\tau, \theta) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau$	$S(\theta, \tau) = \int H(f, \theta) \exp(-j2\pi f\tau) df$
Dominios (θ, t)	
$S(\tau, \theta) = \int h(\tau, t) \exp(-j2\pi\theta t) dt$	$h(t, \tau) = \int S(\tau, \theta) \exp(-j2\pi\theta t) d\theta$
$H(f, \theta) = \int T(f, t) \exp(-j2\pi\theta t) dt$	$T(f, t) = \int H(f, \theta) \exp(-j2\pi\theta t) d\theta$

Tabla. 2.3. Expresiones de las transformaciones entre funciones de sistema.

La caracterización de un canal móvil mediante las funciones básicas de Bello, es puramente teórica. Los canales reales varían aleatoriamente con el tiempo, por lo que las funciones de sistema se convierten en procesos estocásticos. Como para la descripción completa de un proceso se necesita conocer la función de densidad de probabilidad multidimensional en los instantes (t_1, t_2, \dots, t_N) para todo N, este enfoque complica enormemente el estudio hasta el punto de hacerlo inviable, por lo que de forma análoga a como se procede en teoría de señal, se realiza un estudio aproximado (y en ocasiones suficiente) utilizando las funciones de correlación. Si los proceso fueran gaussianos de medias nulas, estas funciones $R(t_i, t_j)$ bastarían para su caracterización estadística completa.

Teniendo en cuenta que las funciones de sistema son, en general, complejas sus funciones correlación serán:

$$R_h(t_1, t_2; \tau_1, \tau_2) = E[h^*(t_1, \tau_1)h(t_2, \tau_2)]$$

$$R_T(f_1, f_2; t_1, t_2) = E[T^*(f_1, t_1)T(f_2, t_2)]$$

$$R_H(f_1, f_2; \vartheta_1, \vartheta_2) = E[H^*(f_1, \vartheta_1)H(f_2, \vartheta_2)]$$

$$R_S(\tau_1, \tau_2; \vartheta_1, \vartheta_2) = E[S^*(\tau_1, \vartheta_1)S(\tau_2, \vartheta_2)]$$

Como entre las funciones de sistema existen relaciones de transformación de Fourier, tales relaciones se trasladan también a las funciones de correlación en forma de transformadas dobles como se ve en la **Tabla 2.4**.

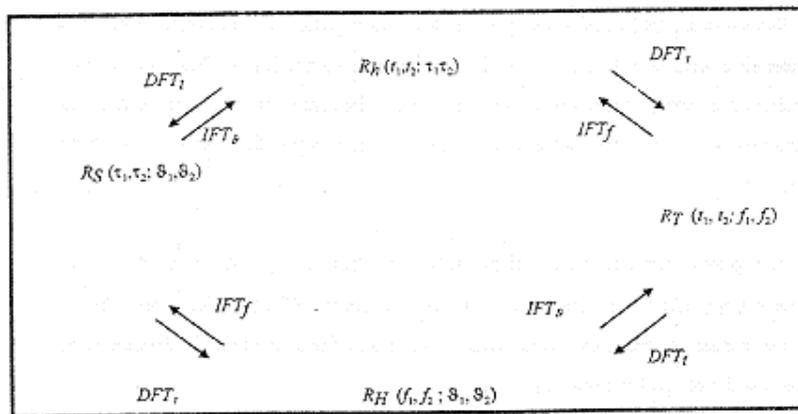


Tabla .2.4. Relaciones entre las funciones de correlación de sistema para canales multitrayecto.

Seguidamente se relacionan las expresiones matemáticas de las dobles transformadas de Fourier.

$$\begin{aligned}
 R_T(f_1, f_2; t_1, t_2) &= \iint R_h(t_1, t_2; \tau_1, \tau_2) \exp[-j2\pi(f_2\tau_2 - f_1\tau_1)] d\tau_1 d\tau_2 \\
 R_h(t_1, t_2; \tau_1, \tau_2) &= \iint R_T(f_1, f_2; t_1, t_2) \exp[j2\pi(f_2\tau_2 - f_1\tau_1)] df_1 df_2 \\
 R_T(f_1, f_2; t_1, t_2) &= \iint R_H(f_1, f_2; \vartheta_1, \vartheta_2) \exp[j2\pi(\vartheta_2 t_2 - \vartheta_1 t_1)] d\vartheta_1 d\vartheta_2 \\
 R_H(f_1, f_2; \vartheta_1, \vartheta_2) &= \iint R_T(f_1, f_2; t_1, t_2) \exp[-j2\pi(\vartheta_2 t_2 - \vartheta_1 t_1)] dt_1 dt_2 \\
 \\
 R_S(\tau_1, \tau_2; \vartheta_1, \vartheta_2) &= \iint R_H(f_1, f_2; \vartheta_1, \vartheta_2) \exp[j2\pi(f_2\tau_2 - f_1\tau_1)] df_1 df_2 \\
 R_H(f_1, f_2; \vartheta_1, \vartheta_2) &= \iint R_S(\tau_1, \tau_2; \vartheta_1, \vartheta_2) \exp[-j2\pi(f_2\tau_2 - f_1\tau_1)] d\tau_1 d\tau_2 \\
 R_h(t_1, t_2; \tau_1, \tau_2) &= \iint R_S(\tau_1, \tau_2; \vartheta_1, \vartheta_2) \exp[j2\pi(\vartheta_2 t_2 - \vartheta_1 t_1)] d\vartheta_1 d\vartheta_2 \\
 R_S(\tau_1, \tau_2; \vartheta_1, \vartheta_2) &= \iint R_h(t_1, t_2; \tau_1, \tau_2) \exp[-j2\pi(\vartheta_2 t_2 - \vartheta_1 t_1)] dt_1 dt_2
 \end{aligned}$$

Pese a la simplificación que supone la utilización de las funciones de correlación, aún es complicada la caracterización de los canales mediante ellas, por lo que aprovechando el comportamiento de los canales móviles multitrayecto que se observa en la práctica, es posible efectuar ulteriores simplificadores que facilitan el tratamiento de las señales.

Así, para recorridos del móvil pequeño, los tiempos t_1 y t_2 difieren un poco y los procesos $h(t, \tau)$ y $H(t, f)$ son estacionarios en sentido amplio WSS (Wide Sense Stationary), por lo cual las funciones de correlación dependen únicamente de la diferencia de tiempos, quedando las funciones en forma:

$$\begin{aligned}
 R_h(t_2 - t_1; \tau_1, \tau_2) \\
 R_T(t_2 - t_1; f_1, f_2)
 \end{aligned}$$

Es fácil demostrar que la propiedad WSS implica la incorrelación en la variable Doopler, por lo que las funciones R_S y R_H adquieren la forma:

$$\begin{aligned}
 R_S(\tau_1, \tau_2; \vartheta_1, \vartheta_2) &= \delta(\vartheta_2 - \vartheta_1) P_S(\tau_1, \tau_2; \vartheta) \\
 R_H(f_1, f_2; \vartheta_1, \vartheta_2) &= \delta(\vartheta_2 - \vartheta_1) P_S(f_1, f_2; \vartheta)
 \end{aligned}$$

Siendo ambas nulas para $\vartheta_1 \neq \vartheta_2$

Se dice entonces que el canal tiene dispersión Doppler incorrelada o que es un canal US (Uncorrelated Scattering).

Como las variables t , f y τ , ϑ son duales, un canal WSS en la variable f , es US en la variable τ , por lo que las funciones de correlación quedan:

$$\begin{aligned} R_T(f_1, f_2; t_1, t_2) &= R_T(f_2 - f_1; t_1, t_2) \\ R_H(f_1, f_2; \vartheta_1, \vartheta_2) &= R_T(f_2 - f_1; \vartheta_1, \vartheta_2) \\ R_h(t_1, t_2; \tau_1, \tau_2) &= \delta(\tau_2 - \tau_1) P_h(t_1, t_2; \tau) \\ R_s(\tau_1, \tau_2; \vartheta_1, \vartheta_2) &= \delta(\tau_2 - \tau_1) P_s(\vartheta_1, \vartheta_2; \tau) \end{aligned}$$

Los canales móviles reales tienen, con buena aproximación las propiedades de ser WSS en la variable t y US en la variable τ , denominándoseles, abreviadamente, canales WSSUS. Como consecuencia, son también estacionarios en la variable f y con dispersión incorrelada en la variable ϑ por lo cuál, finalmente, las funciones de correlación quedan como sigue:

$$\begin{aligned} \text{IDSF: } R_h(u; \tau_1 - \tau_2) &= \delta(\tau_2 - \tau_1) P_h(u; \tau) \\ \text{TVTF: } R_T(v, u) & \\ \text{ODSF: } R_H(v; \vartheta_1 - \vartheta_2) &= \delta(\vartheta_2 - \vartheta_1) P_H(v, \vartheta) \\ \text{DDSF: } R_s(\tau_1, \tau_2; \vartheta_1, \vartheta_2) &= \delta(\vartheta_2 - \vartheta_1) \delta(\tau_2 - \tau_1) P_s(\tau, \vartheta) \end{aligned}$$

Donde $u = t_2 - t_1$ y $v = f_2 - f_1$. Como se ve en el canal WSSUS las funciones de correlación se expresa en términos de nuevas funciones de dos variables que están vinculadas entre sí mediante transformaciones de Fourier, como se indica en la **Tabla 2.5**.

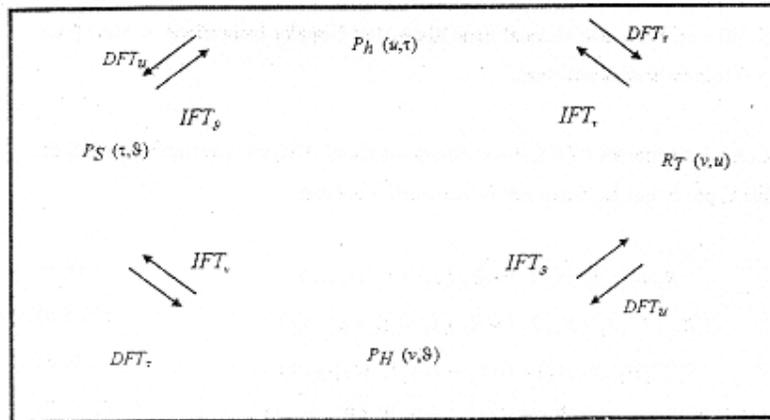


Tabla. 2.5. Funciones características de canales móviles WSSUS.

Las características de estacionariedad e incorrelación del canal WSSUS solo se pueden considerar válidas para pequeños desplazamientos del móvil, de unos 10 m. de longitud en un entorno homogéneo. El intervalo de tiempo correspondiente es adecuado para las medidas dinámicas de la tasa de errores.

En la práctica, basta con especificar una de las cuatro funciones anteriores, puesto que a partir de ella pueden obtenerse las demás. Se suele obtener mediante una estimación de PS, ya que esta recoge las características de dispersión de retardo y de dispersión Doppler propias del canal variable multitrayecto.

2.11 FUNCIÓN DE RESPUESTA IMPULSIVA IDSF

La función de respuesta impulsiva variable con el tiempo $h(t, \tau)$ describe la respuesta del canal en el instante t a una excitación aplicada en el instante $t - \tau$, siendo τ la variable de retardo y t la variable temporal. Como el desplazamiento del móvil es $x = vt$, también puede formularse la respuesta en términos de distancia en vez de tiempo. Cada tipo de entorno puede caracterizarse por una cierta función $h(t, \tau)$ o $h(x, \tau)$. Si $x(t)$ es una señal pasabajo equivalente PBE aplicada al canal de respuesta impulsiva $h(t, \tau)$ la señal PBE de salida $y(t)$ será:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - \tau)h(t, \tau)d\tau \tag{2.67}$$

Esta integral es similar a la convolución clásica operando τ como variable. Los límites se ajustarán a la realizabilidad física de $x(t)$ y $h(t,\tau)$. Así para $\tau < 0$ y $t < \tau$, $h(t,\tau)$ debe ser nula.

Como se está trabajando con representaciones PBE, a $h(t,\tau)$ se le llama respuesta impulsiva compleja PBE del canal. Es bien conocido que $h(t,\tau)$ puede obtenerse como respuesta del canal cuando se aplica a su entrada una función δ de Dirac en el instante $t-\tau$.

Utilizando el modelo de dispersores, puede escribirse:

$$h(t,\tau) = A \sum_i p_i \exp[j(\omega_{di}t - \theta_i)] \delta(\tau - \tau_i) \quad (2.68)$$

La función de autocorrelación de $y(t)$ será en términos de R_h , la siguiente:

$$R_y(t_1, t_2) = \int \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t_1 - \tau_1) x(t_2 - \tau_2) R_h(t_1, t_2; \tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (2.69)$$

En el caso de un canal WSSUS, sustituyendo el valor de R_h resulta:

$$\begin{aligned} R_y(t_1, t_1 + u) &= \int \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t_1 - \tau_1) x(t_1 + u - \tau_2) \delta(\tau_2 - \tau_1) P_h(u, \tau_1) d\tau_1 d\tau_2 \\ R_y(t_1, t_1 + u) &= \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t_1 - \tau) x(t_1 + u - \tau) P_h(u, \tau) d\tau \end{aligned} \quad (2.70)$$

Para $u = 0$ queda:

$$R_y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t - \tau)|^2 P_h(\tau) d\tau \quad (2.71)$$

Siendo $P_h(0, \tau) = p(\tau)$ la función de densidad espectral potencia-retardo.

Si $|x(t)|^2$ es un impulso de Dirac, resulta

$$R_y(t) = P_h(t) \quad (2.72)$$

Es decir la función de autocorrelación de la salida del canal, para una separación temporal nula, queda descrita por el perfil de la distribución temporal de la potencia

recibida. La ecuación anterior es válida siempre que $|x(t)|^2$ sea impulsiva (de muy corta duración) respecto a $P_h(t)$ o lo que es lo mismo la transformada de Fourier de $|x(t)|^2$ debe ser constante en el intervalo de frecuencias en el que la transformada $P_h(t)$ es distinta de cero. Por comodidad, se redefine el origen de $P_h(t)$ refiriéndolo al tiempo t_0 de llegada del primer eco (que suele ser el más intenso), expresándose entonces la función Ph en términos de la variable $\tau = t - t_0$ denominada exceso de retardo (delay exceso) de forma que:

$$P_h(\tau) = P_h(t - t_0) \quad (2.73)$$

$P_h(\tau)$ puede considerarse como el promedio de la función de dispersión del canal sobre todos los valores del desplazamiento Doppler y su conocimiento proporciona una información primaria sobre las características de dispersión temporal del canal y distribución estadística de las intensidades de ecos.

La función $P_h(t, \tau)$ es también igual al valor medio:

$$P_h(t, \tau) = \langle |h(t, \tau)|^2 \rangle \quad (2.74)$$

Por lo que puede estimarse $P_h(\tau)$ promediando esta función sobre cierto número de muestras:

$$P_h(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^M |h(t_i, \tau)|^2}{M} \quad (2.75)$$

La respuesta impulsiva $h(t, \tau)$ puede obtenerse mediante mediciones con onda continua (sondador CW) del canal, a partir de la función $T(f, t)$.

La función $Ph(\tau)$ se denomina perfil potencia – retardo del canal (PDP: Power Delay Profile) y se suele designar simplemente mediante $P(\tau)$.

El PDP es pues una característica importante de los canales multitrayecto y a partir de él se definen varios parámetros que influyen en la estimación de la calidad de funcionamiento de los sistemas móviles digitales. Se estudian aquí los siguientes:

- Retardo máximo.

- Dispersión del retardo (Delay Spread, DS).
- Ventana de retardo (Delay Window, DW).
- Intervalo de retardo (Delay Interval, DI).

En la práctica se manejan perfiles de retardo obtenidos a partir de mediciones. En las medidas hay siempre un umbral de ruido (NF: Noise Floor) por debajo del cual se considera que lo que se mide es ruido térmico así que no contribuye a la definición del PDP.

En la **Figura 2.16** se representa un PDP típico con su NF. La duración del perfil es igual al intervalo que media entre el primer cruce por NF y el último, aunque puede haber cruces intermedios.

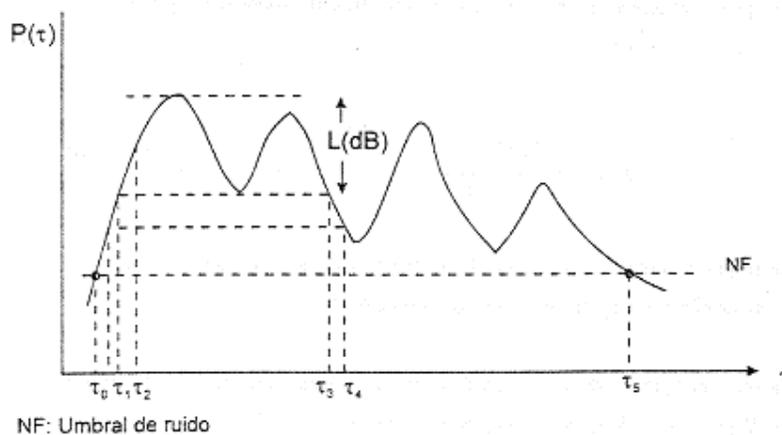


Figura. 2.16. PDP típico con NF

El retardo máximo τ_{\max} viene dado por el valor de τ para el último cruce por NF.

En la figura $\tau_{\max} = \tau_5$. El retardo mínimo τ_{\min} es el valor de τ que corresponde al primer cruce por NF. En la figura $\tau_{\min} = \tau_0$.

La dispersión de retardo, se define como sigue:

$$D = \left[\frac{\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} (\tau - \bar{D})^2 P(\tau) d\tau}{\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} P(\tau) d\tau} \right] \quad (2.76)$$

Donde \bar{D} es el retardo medio dado por:

$$\bar{D} = \frac{\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \tau \cdot P(\tau) d\tau}{\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} P(\tau) d\tau} \quad (2.77)$$

2.12 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA VARIABLE CON EL TIEMPO: TVTF

La función de transferencia variable con el tiempo $T(f,t)$ es la transformada de Fourier de la función impulsiva $h(t,\tau)$. Puede utilizarse para calcular la señal PBE de salida $y(t)$ si se conoce la transformada $X(f)$ de la señal PBE de entrada ya que:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) T(f,t) \exp(j2\pi ft) df \quad (2.78)$$

La función $T(f,t)$ puede obtenerse como respuesta del canal a una excitación cisonal empleando el modelo de dispersores. En efecto, para la excitación $s(t) = \exp(j\omega_c t)$, la respuesta es:

$$T(f_c, t) \exp(j\omega_c t)$$

Resulta inmediato verificar que sustituyendo $x(t)$ por 1 se obtiene:

$$T(f_c, t) = A \sum_i \rho_i \exp[-j(\omega_c \tau_i + \theta_i - \omega_{di} t)] \quad (2.79)$$

$T(f_c, t)$ puede interpretarse como la suma de N favores con amplitud relativa ρ_i , fase θ_i , retardo τ_i y desplazamiento Doppler ν_i , magnitudes aportadas por el dispersor i -ésimo.

En los ejercicios de simulación, se sintetiza esta función como suma de fasores, eligiendo los valores de los cuatro parámetros a partir de estadísticas adecuadas, por ejemplo ρ_i según una distribución de Rayleigh, τ_i según un proceso de Poisson, θ_i según una distribución uniforme en $(-\pi, \pi)$ y ν_i a partir de la densidad de probabilidad del desplazamiento Doppler.

Generalizando para cualquier frecuencia de portadora, tendremos:

$$T(f, t) = A \sum_i \rho_i \exp[-j(\omega \tau_i - \omega_{di} t + \theta_i)] \quad (2.80)$$

La transformada inversa $T(f, t)$ es la función de respuesta impulsiva $h(t, \tau)$, luego:

$$h(t, \tau) = A \sum_i \rho_i \exp[j(\omega_{di} t - \theta_i)] \delta(\tau - \tau_i) \quad (2.81)$$

Esta interpretación de $T(f, t)$ como suma de múltiples rayos tiene interés porque proporciona una visión física de la propagación multitrayecto en el entorno móvil, y es la base del desarrollo de métodos de simulación en los que se obtiene $T(f, t)$.

2.13 FUNCIÓN DE DISPERSO DE RETARDO – DESPLAZAMIENTO DOOPLER: DDSF

La función $S(\tau, \nu)$ proporciona información sobre las dos dispersiones, temporal (τ) y frecuencial (Doppler, ν) que aparecen en los canales móviles multitrayecto. Es por ello una función muy valiosa para la caracterización de estos canales y, en consecuencia, se ha tomado como base para el desarrollo de modelos de simulación software de los canales.

Supuesta la señal PBE de entrada $x(t)$, la señal PBE de salida correspondiente $y(t)$ expresada en términos de la función $S(\tau, \nu)$ es:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\nu \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau) S(\tau, \nu) \exp[j2\pi\nu\tau] d\tau \quad (2.82)$$

Esta expresión matemática permite interpretar $S(\tau, \nu) d\tau d\nu$, como la función de transferencia compleja elemental que encuentra la señal de entrada en el intervalo $[\tau, \tau + d\tau; \nu, \nu + d\nu]$. La señal $y(t)$ es la suma de señales elementales afectadas por $S(\tau, \nu)$ es decir sometidas a retardos y desplazamientos Doppler. $S(\tau, \nu)$ describe la modulación aleatoria de la amplitud y fase experimentada por la señal $x(t)$ aplicada $(t - \tau)$.

Como ya se comentó anteriormente, en los canales aleatorios interesa describir las señales mediante funciones de autocorrelación. Para $y(t)$, se tiene:

$$R_y(t, t + u) = \overline{y^*(t) y(t + u)} \quad (2.83)$$

Sustituyendo el valor de $y(t)$ dado se expresa R_y en términos de la autocorrelación de $x(t)$ y de P_s , supuesto el canal de tipo WSS. Se obtiene así:

$$R_y(t, t+u) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} x^*(t-\tau)x(t+u+\tau)P_s(\tau, \vartheta) \exp(j2\pi\vartheta u) d\vartheta d\tau \quad (2.84)$$

Para $u = 0$ resulta

$$R_y(t) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t-\tau)|^2 P_s(\tau, \vartheta) d\vartheta d\tau \quad (2.85)$$

De forma similar la expresión puede escribirse

$$P_s(\tau, \vartheta) = \langle |S(\tau, \vartheta)|^2 \rangle \quad (2.86)$$

Si obtenemos diferentes cortes de P_s para tiempos τ_i y promediamos sus valores, resulta una función similar al Power Delay Profile que se llama Power Doppler Profile y designamos por $S(\vartheta)$

$$S(\vartheta) = \frac{\sum_{i=1}^M P_s(\tau_i, \vartheta)}{M} \quad (2.87)$$

Al momento central de segundo orden (referido a la media) de $S(\vartheta)$ se le llama Dispersión Doppler del canal (Doppler Spread) y es un concepto paralelo del de dispersión temporal.

$$\text{Su expresión es } B = \left[\frac{\int_{-fd}^{fd} [\vartheta - \bar{\vartheta}]^2 S(\vartheta) d\vartheta}{\int_{-fd}^{fd} S(\vartheta) d\vartheta} \right]^{1/2} \quad (2.88)$$

Siendo $\bar{\vartheta}$ el valor medio:

$$\bar{\vartheta} = \frac{\int_{-fd}^{fd} \vartheta S(\vartheta) d\vartheta}{\int_{-fd}^{fd} S(\vartheta) d\vartheta} \quad (2.89)$$

Y fd el valor máximo del desplazamiento Doppler.

La función P_s se utiliza para el modelado determinístico sintético de canales móviles multitrayecto. Los modelos basados en mediciones utilizan funciones P_s obtenidas experimentalmente.

2.14 ESTADÍSTICAS DE LAS SEÑALES DE RESPUESTA

Se va a estudiar las estadísticas de $r(t)$ y d e(t) que más interés tienen para el análisis, diseño y simulación de los sistemas de comunicaciones móviles.

La función densidad de probabilidad de r es:

$$f(r) = \frac{r}{\bar{\omega}} \exp(-r^2 / 2\bar{\omega}) \quad (2.90)$$

Donde $\bar{\omega} = \overline{r^2} / 2$ es la potencia media. El valor mediano de r es:

$$\tilde{r} = \sqrt{2 \ln(\bar{\omega})} \quad (2.91)$$

Y la función de distribución vale:

$$F(r) = 1 - \exp(-r^2 / 2\bar{\omega}) \quad (2.92)$$

La probabilidad de que exista un desvanecimiento superior a D dB, con relación a la mediana es:

$$p(D) = 1 - \exp(-\ln 2 \cdot 10^{-D/10}) \approx \ln(2 \cdot 10^{-D/10}) \quad (2.93)$$

Siendo $D = 20 \log(\tilde{r} / r)$

La dispersión temporal de un sistema de banda estrecha carece de relieve, pues se reduce a un solo bin temporal. En cambio tiene mucho interés la caracterización Doopler y otras estadísticas de segundo orden de las que se trata a continuación. La primera se realiza en términos de la densidad espectral de potencia de la señal $r(t)$ recibida.

Supuesta una antena receptora isótropa y para una distribución uniforme de los ángulos de llegada, el valor de la densidad espectral de frecuencia para frecuencias positivas es:

$$S_r(f) = \frac{2\bar{w}}{w_d} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{f - f_c}{f_d}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (2.94)$$

Donde f_d es el máximo desplazamiento Doopler ($f_d = v/\lambda$)

$S_r(f)$ es el valor de la función $P_s(\tau, \nu)$ para los canales de banda estrecha. Con las hipótesis adoptadas resulta independiente de τ .

En la **Figura 2.17** se representa esta densidad espectral.

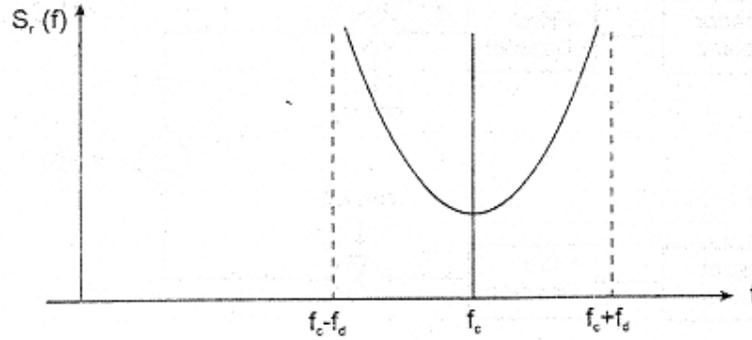


Figura. 2.17. Densidad espectral.

Llevando el valor de $S_r(f)$ dado y teniendo en cuenta que $\overline{v} = f_d$ en este caso resulta, para la dispersión Doppler el valor:

$$B = \frac{f_d}{\sqrt{2}} \quad (2.95)$$

Que es igual al valor eficaz del desplazamiento Doppler máximo.

La característica Doppler se utiliza para la simulación física o lógica del efecto multitrayecto. Para ello se hace uso de las características gaussianas de TI y TQ y del hecho de que las relaciones que definen estas componentes son lineales, por lo que pueden considerarse TI y TQ como procesos gaussianos pasabajo obtenidos a través de generadores gaussianos cuya salida se aplica a filtros Doppler.

En consecuencia, puede obtenerse un perfil Rayleigh de desvanecimiento multitrayecto mediante el esquema conceptual de la **Figura 2.18**.

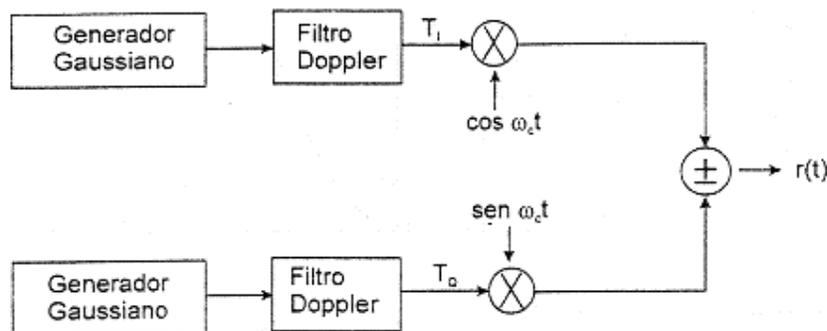


Figura. 2.18. Esquema perfil Rayleigh.

En el dominio temporal, la función de autocorrelación de la señal $r(t)$ se obtiene como transformada inversa de Fourier de la densidad espectral de potencia, resultando:

$$R_r(u) = \overline{w} J_0(2\pi f_d u) \cos w_c u \tag{2.96}$$

Siendo $J_0(x)$ la función de Bessel de primera especie y de orden cero.

En el caso de que exista un trayecto directo, o con visibilidad LOS, el modelo de propagación tiene dos componentes básicas:

1. Señal LOS (Directa)

$$A_0 \cos(\omega_c + \omega_{d0})t$$

Donde f_{do} es el desplazamiento Doppler para el rayo directo, cuyo valor es:

$$f_{do} = -f_d \cos \alpha_0 \tag{2.97}$$

Siendo $f_d = v/\lambda$ y α_0 el ángulo formado por el rayo directo y la dirección de movimiento del vehículo.

2. Señal NLOS (Multitrayecto con dispersión).

$$T_1(f_c, t) \cos \omega_c t - T_Q(f_c, t) \sin \omega_c t$$

La señal resultante es:

$$r(t) = A_0 \cos(\omega_c + \omega_0)t + A \sum_i \rho_i \cos[(\omega_c + \omega_{di})t - \omega_c \tau_0 - \theta_i] \tag{2.98}$$

La densidad espectral de potencia de $r(t)$ tiene una componente discreta representada por una función δ de Dirac:

$$S_r(f) = \frac{A_0^2}{2} \delta[f - (f_c + f_{d0})] + \frac{2\overline{w}}{\omega_d} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{f - f_c}{f_d}\right)^2\right]^{1/2}} \tag{2.99}$$

En la **Figura 2.19** se representa $S_r(f)$

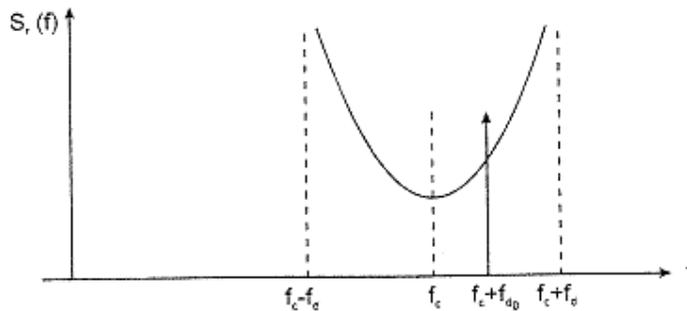


Figura .2.19. $S_r(f)$

Por último la función autocorrelación de $r(t)$ será:

$$R_r(u) = \frac{A_0^2}{2} \cos(\omega_c + \omega_d)u + \overline{w} J_0(2\pi f_d u) \cos \omega_c u \quad (2.100)$$

Otras características de multitrayecto que tienen interés en las comunicaciones móviles y se calculan utilizando estadísticos de segundo orden son:

1. Número de cruces por un cierto nivel por unidad de tiempo: LCR (Level Crossing Rate).
2. Duración media de los desvanecimientos: ADF (Average Duration of Fades).

Si consideramos un nivel de tensión de la señal $r(t)$ igual a r , el número de veces por segundo que $r(t)$ cruza dicho nivel en sentido ascendente es:

$$LCR(\rho) = \sqrt{2\pi} f_d \rho \exp(-\rho^2) \quad (2.101)$$

Siendo f_d el desplazamiento Doppler máximo y:

$$\rho = r / (\overline{r^2})^{1/2} = r / r_{rms} \quad (2.102)$$

Si dividimos $LCR(\rho)$ por la velocidad del móvil, supuesta constante, se obtiene el número de cruces del nivel normalizado ρ por metro recorrido:

$$\frac{LCR(\rho)}{v} = \sqrt{2\pi} \frac{1}{\lambda} \rho \exp(-\rho^2) \quad (2.103)$$

Por último es posible expresar el número de cruces por longitud de onda, resultando:

$$\frac{LCR(\rho)\lambda}{v} = \sqrt{2\pi} \rho \exp(-\rho^2) \quad (2.104)$$

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL SOFTWARE DE MODELOS DE PROPAGACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CANAL MÓVIL EN VISUAL BASIC/VISUAL C++/MATLAB

3.1 ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN MÁS IMPORTANTES

Existen un sinnúmero de modelos de propagación los cuáles varían en exactitud dependiendo de la complejidad del modelo y de las características del ambiente donde son aplicados. Los modelos de propagación tanto para microceldas como para macroceldas que están programados en el software han sido elegidos por las siguientes características: bajo error que presentan entre el valor estimado y el valor medido, utilización en la vida práctica, son los modelos de propagación recomendados por la UIT-R y además algunos modelos han sido desarrollados por la COST lo cuál garantiza exactitud en los resultados.

Los modelos seleccionados para ser programados en el software son los siguientes:

Microceldas:

Modelos LOS:

- Modelo Lund.
- Modelo UIT-R 8/1.

Modelos NLOS:

- COST-231-Lund.
- Modelo Dresde.

Macrocelas:

- Modelo de Egly.
- Modelo de Okumura-Hata.
- Modelo COST-231-Hata.
- Modelo de Ikegami.
- Modelo Walfish-Bertoni.
- Modelo Sakagami-Kuboi.

- Modelo COST-231(Walfish-Ikegami),

Los modelos anteriormente presentados fueron desarrollados teóricamente en el capítulo anterior por lo que este capítulo será dedicado a la programación de los modelos seleccionados.

3.2 PROGRAMACIÓN DE LOS MODELOS PARA MICROCELDAS

Para empezar la programación de los modelos es necesario crear un espacio de trabajo, en el caso del software de modelos y simulación del canal móvil este espacio de trabajo será programado en Visual C++, utilizando Visual Basic y Matlab como herramientas auxiliares.

Para crear un workspace en Visual C++ se abre el programa y se crea un nuevo proyecto, este proyecto es un proyecto .exe basado en MFC y lleva el nombre de cccorpmobile como se ve en la **Figura 3.1**.

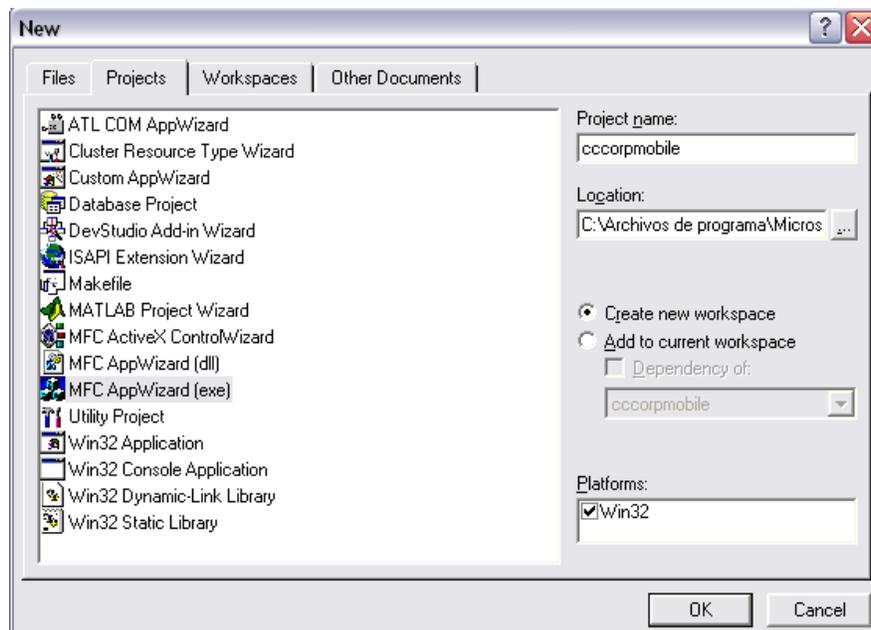


Figura. 3.1. Creación del proyecto cccorpmobile.

El proyecto cccorpmobile es un proyecto tipo documento simple, para crear este documento se elige Single document como se ve en la **Figura 3.2**.

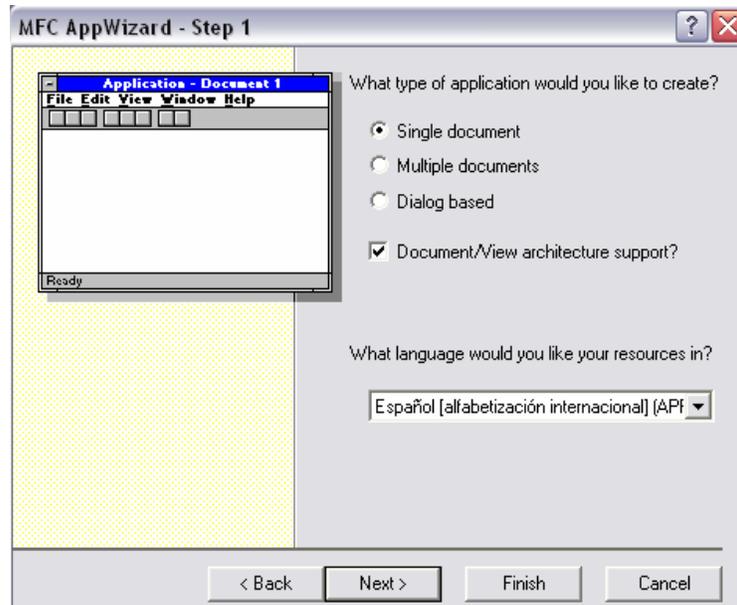


Figura 3.2. Creación de un Single document.

Se presiona Finalizar y el proyecto cccorpmobile ha sido creado.

Para microceldas el software se ha dividido en modelos LOS y NLOS, para tener estas dos opciones se abre la carpeta Resources y se elige Menu en el workspace, ahora se escribe el nombre de los componentes para microceldas como se ve en la **Figura 3.3**.

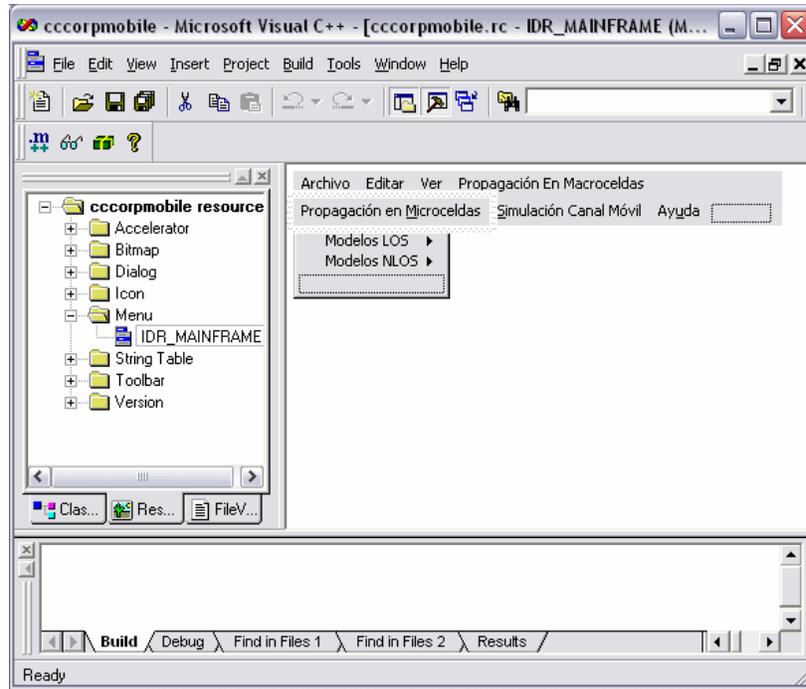


Figura. 3.3. Creación de LOS y NLOS.

3.2.1 Programación de modelos LOS.

Para modelos LOS el software se ha dividido en los modelos Lund y UIT-R 8/1, para tener estas dos opciones se abre la carpeta Resources y se elige Menu en el workspace, ahora se escribe el nombre de los componentes para modelos LOS como se ve en la **Figura 3.4**.

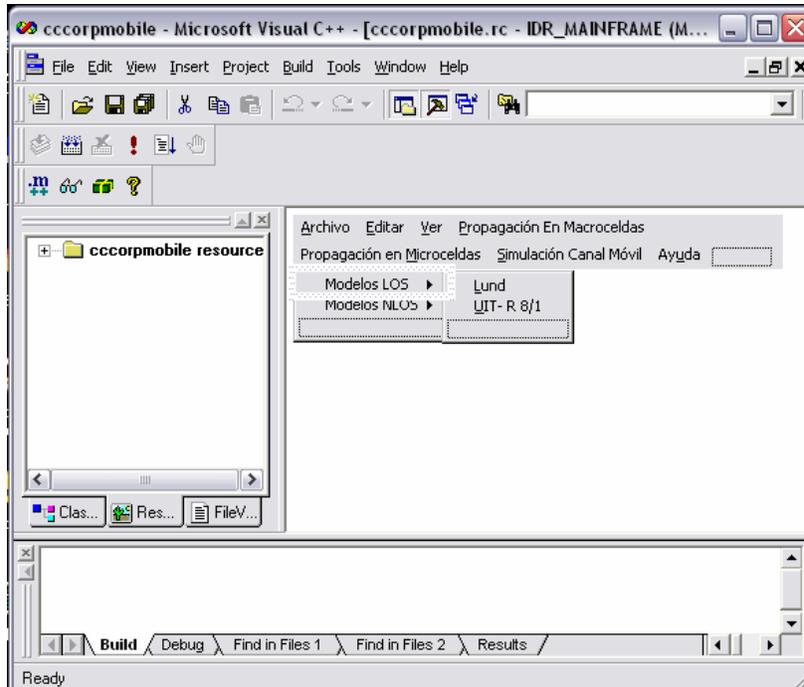


Figura 3.4. Creación de modelos LOS.

3.2.1.1 Programación del modelo Lund.

Para la programación del modelo de Lund se crea un cuadro de diálogo que contenga los parámetros de entrada necesarios para realizar los cálculos de pérdidas de propagación que este modelo requiere estos son: exponentes n_1 y n_2 , la frecuencia f en MHz, la distancia d en metros, las alturas h_t y h_m en metros. Además se puede fijar un d_{tp} fijo o este puede ser calculado mediante las alturas h_m y h_t y un botón que permite al usuario realizar los cálculos. **Figura 3.5.**

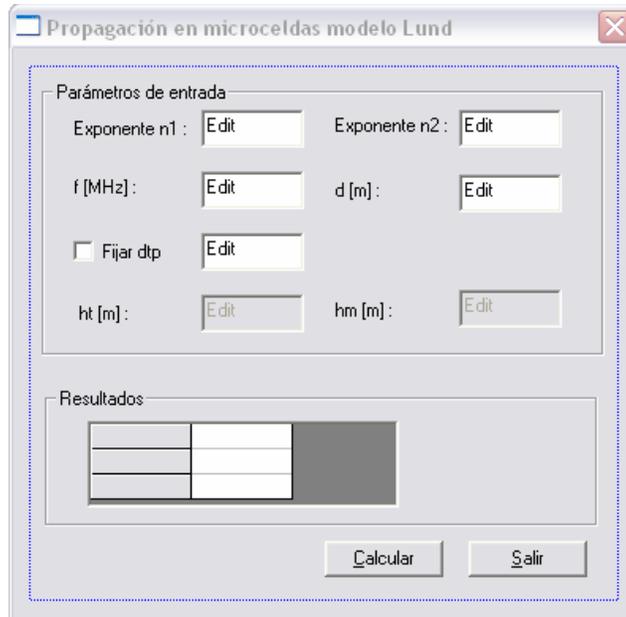


Figura. 3.5. Modelo de Lund.

Los resultados son presentados en una grilla de datos que permitirá obtenerlos ordenadamente. Es necesario que cuando el usuario elija fijar un dtp los cuadros de edición de hm y ht estén deshabilitados o cuando decida no fijar un dtp estos se habiliten, esto se logra con un check box el cuál permite habilitar o deshabilitar estos cuadros de edición.

Para calcular las pérdidas de propagación se añade una función en el botón Calcular dando doble click en este.

3.2.1.1 Programación del modelo UIT-R 8/1

Para el modelo UIT-R 8/1 se crea un cuadro de diálogo con los siguientes parámetros de entrada: frecuencia f en MHz, distancia d en metros, dtp y alturas ht y hm en metros como se ve en la **Figura 3.6**.



Figura. 3.6. Modelo UIT-R 8/1

Para realizar los cálculos se realiza una función en el botón Calcular haciendo doble click en este.

3.2.2 Programación de modelos NLOS.

Para modelos NLOS el software se ha dividido en los modelos COST 231 Lund y Dresde, para tener estas dos opciones se abre la carpeta Resources y se elige Menu en el workspace, ahora se escribe el nombre de los componentes para modelos NLOS como se ve en la **Figura 3.7.**

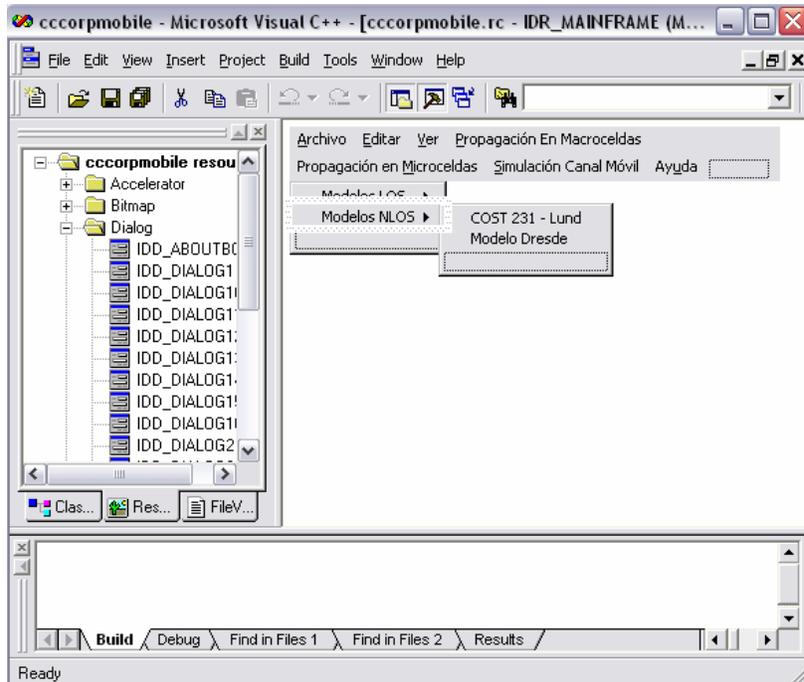


Figura. 3.7. Modelos NLOS

3.2.2.1 Programación del modelo COST 231-Lund.

Para el modelo COST 231-Lund se crea un cuadro de diálogo con los siguientes parámetros de entrada distancias x , y en metros, anchuras w_d y w_l en metros, y las pérdidas LOS las cuáles pueden ser ingresadas directamente o pueden ser calculadas mediante los modelos Lund o UIT-R 8/1. Además hay un botón Calcular que da los resultados del modelo y un botón de información que da las características geométricas del modelo como se ve en la **Figura 3.8**.

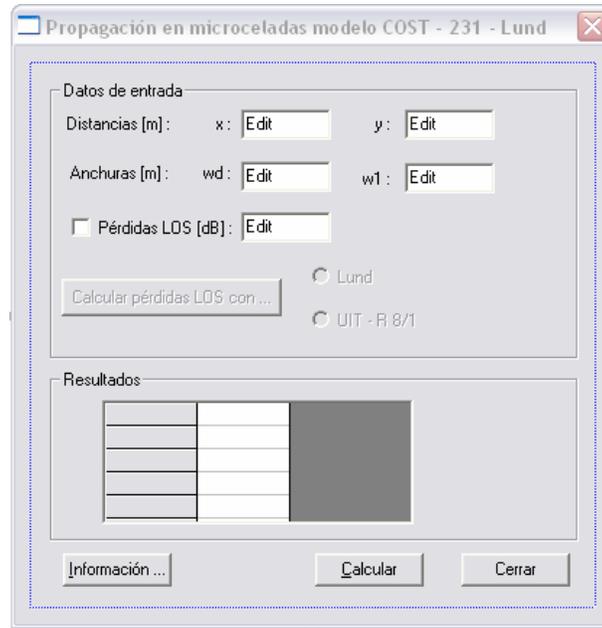


Figura. 3.8. Modelo COST 231-Lund.

Para realizar los cálculos se realiza una función en el botón Calcular haciendo doble click en este.

3.2.2.2 Programación del modelo Dresde.

Para el modelo Dresde se crea un nuevo cuadro de diálogo con los siguientes parámetros de entrada: distancias x , y en metros; anchuras $w1$ y wd en metros y frecuencia f en MHz. Además hay dos botones uno que permite calcular los valores de las pérdidas de propagación y otro que deja visualizar las características geométricas del modelo además de una grilla para visualizar los resultados.



Figura. 3.9. Modelo Dresde.

Para realizar los cálculos se crea una función en el botón de Calcular dando doble click en este.

3.3 PROGRAMACIÓN DE LOS MODELOS PARA MACROCELDAS Y AMBIENTES ABIERTOS

Para modelos de macroceldas y ambientes abiertos el software se ha dividido en los modelos de Okumura-Hata/COST 231-Hata, de Ikegami, de Egli, Sakagami-Kuboi, Walfish-Bertoni y COST-231; para tener estas opciones se abre la carpeta Resources y se elige Menu en el workspace, ahora se escribe el nombre de los componentes para modelos de macroceldas y ambientes abiertos como se ve en la **Figura 3.10.**

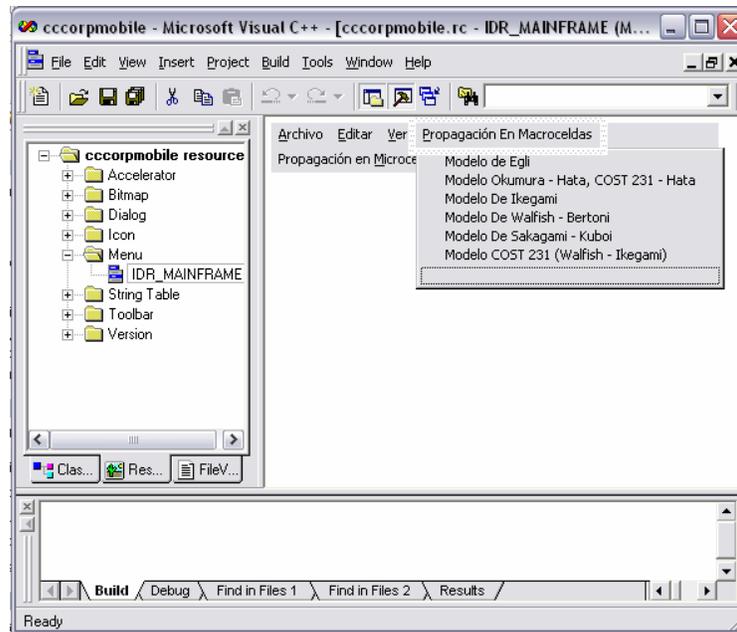


Figura. 3.10. Modelos de macroceldas.

Para desarrollar cada uno de los modelos se ingresa al Class Wizard presionado Ctrl.+W y se elige la función Command en cada uno de los menús.

3.3.1 Modelo Okumura-Hata/COST-231-Hata.

Los modelos Okumura-Hata y COST-231-Hata han sido desarrollados en un solo cuadro de diálogo esto es porque los dos modelos se complementan para abarcar las frecuencias hasta los 2000 MHz. Se crea un cuadro de diálogo con las siguientes variables de entrada: frecuencia f en MHz, ht y hm en metros, distancia d en Km. Además se toman en cuenta las diferentes correcciones del entorno móvil: Zona suburbana, Zona rural, Ciudad media o pequeña, Ciudad grande, y para frecuencias mayores a 1500 MHz y cuando son calculados con el modelo COST 231-Hata las correcciones de tipo medio y áreas urbanas y gran centro metropolitano. Las correcciones son colocadas mediante Check Box. Para la frecuencia de 1500 MHz se puede elegir calcular las pérdidas con cualquiera de los dos modelos mediante dos Radio Button. Por último existe una grilla para imprimir los resultados en pantalla y un botón de Calcular que permite calcular los resultados.

Figura 3.11.



Figura. 3.11. Modelo Okumura-Hata/COST 231-Hata.

Para frecuencias menores a 1500 MHz. se utiliza el método Okumura-Hata, para calcular las pérdidas y para mayores o iguales a 1500 MHz. el método COST 231-Hata, las correcciones del entorno móvil y de altura por móvil están a disposición del usuario, las correcciones por tipo de ciudad solo están disponibles para los cálculos con el modelo COST 231-Hata, por lo tanto se necesita validar estas variables mediante los cambios que se realizan al ingresar la variable frecuencia esto se logra realizando una función ChangeEdit en el Edit 1 de la frecuencia La corrección de la altura del móvil también debe ser validado mediante una función ChangeEdit del Edit 3 altura del móvil.

Para realizar los cálculos de las pérdidas de predicción se realiza una función en el botón Calcular. Para las validaciones se crean funciones en cada uno de los Radio Button.

Mediante todas las validaciones y dependiendo de la frecuencia seleccionada se logra realizar los cálculos ya sea con el modelo Okumura-Hata o COST-231-Hata de una manera exacta.

3.3.2 Programación del modelo de Egli.

Para el modelo de Egli se crea un cuadro de diálogo con las siguientes variables de entrada: frecuencia f en MHz, h_b en metros, h_m en metros y distancia d en Km. cada uno con una variable relacionada tipo double, un botón Calcular, un botón Salir y una grilla para imprimir los resultados en pantalla. Como se ve en la **Figura 3.12.**

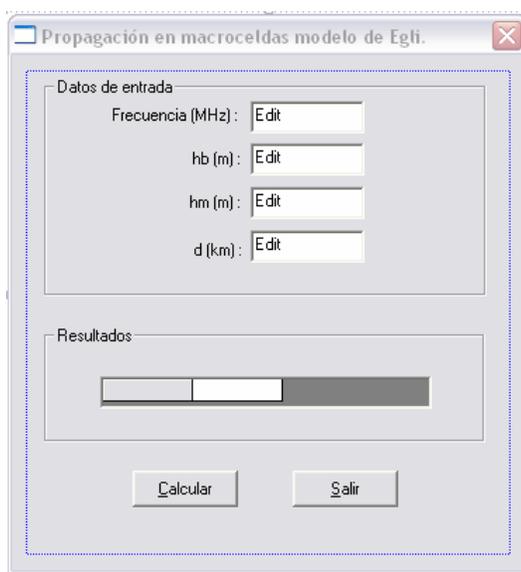


Figura 3.12. Modelo de Egli.

3.3.3 Programación del modelo de Ikegami.

Para el modelo de Ikegami se crea un cuadro de diálogo con los siguientes parámetros de entrada: alturas H y h_r en metros, W en metros, Φ en grados, frecuencia en MHz., distancia d en Km., un check box para calcular o setear I_r , un botón Calcular para realizar los cálculos, un botón Información para mostrar la geometría del modelo, un botón para Salir, y una grilla para imprimir los resultados. Como se ve en la **Figura 3.13.**

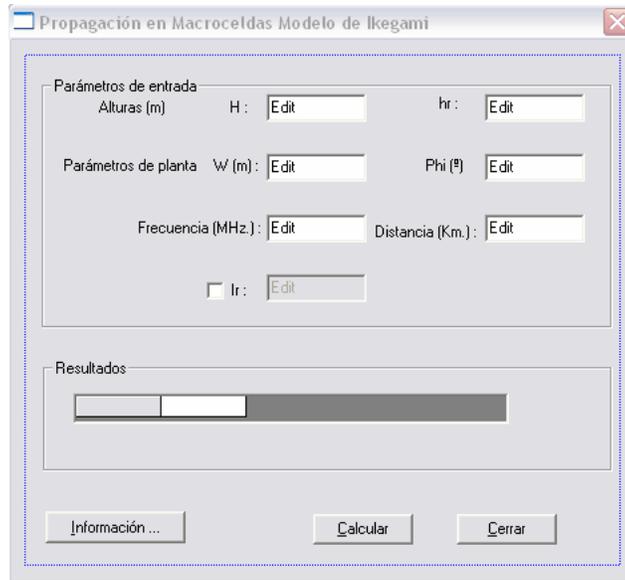


Figura. 3.13. Modelo de Ikegami.

Para realizar los cálculos creamos una función en el botón Calcular. Para calcular Ir o que el usuario pueda ingresarlo se realiza una función en el check box de Ir.

Para observar la geometría del modelo de Ikegami se crea un cuadro de diálogo con la geometría del modelo que es llamado desde una función en el botón de Información.

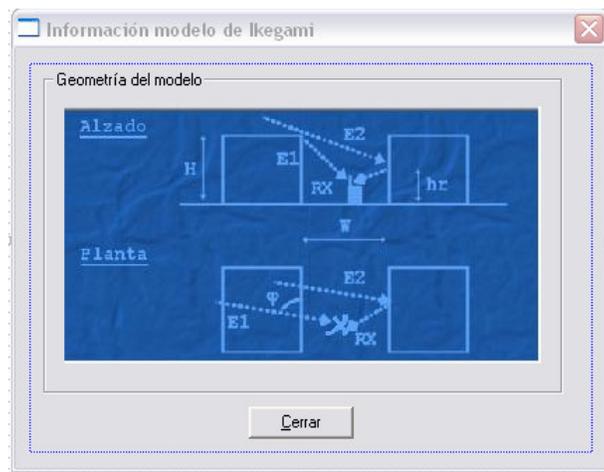


Figura 3.14. Geometría del modelo de Ikegami

3.3.4 Programación del modelo Sakagami-Kuboi.

Para el modelo Sakagami-Kuboi se crea un cuadro de diálogo con los siguientes parámetros de entrada: alturas H, hs, hbo,<H>,hb en metros; W en metros, Phi en grados, frecuencia f en MHz., distancia d en Km., un botón Calcular para realizar los cálculos, un

botón Información para mostrar la geometría del modelo, un botón Salir para cerrar el cuadro de diálogo y una grilla para presentar los resultados en pantalla. Como se observa en la **Figura 3.15**.

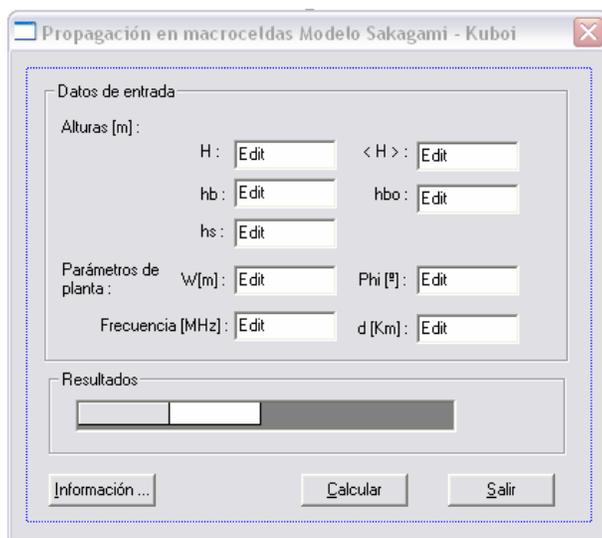


Figura 3.15. Modelo Sakagami-Kuboi.

Para realizar los cálculos del modelo SK creamos una función en el botón Calcular. Para observar la geometría del modelo de SK se crea un cuadro de diálogo con la geometría del modelo que es llamado desde una función en el botón de Información.

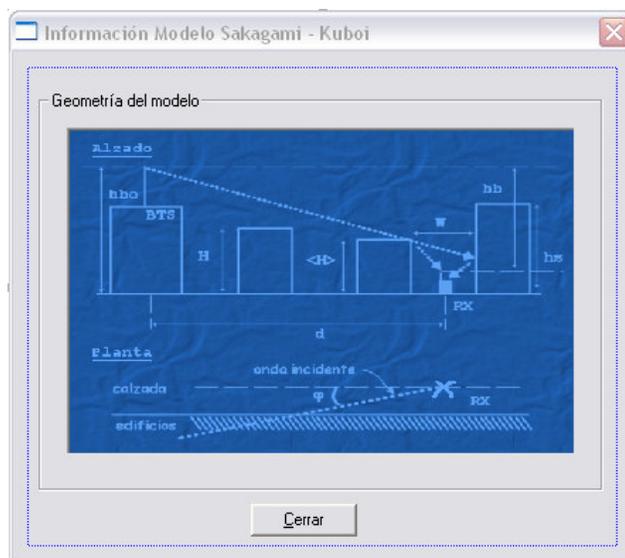


Figura. 3.16. Geometría del modelo SK.

3.3.5 Programación del modelo Walfish –Bertoni.

Para el modelo de Walfish-Bertoni se crea un nuevo cuadro de diálogo con los parámetros de entrada siguientes: alturas H, hm, hr en metros; b en metros, frecuencia f en MHz., distancia d en Km., una grilla para presentar los resultados en pantalla, todas estas variables deben tener una variable relacionada; botones de Calcular para realizar los cálculos, Salir para cerrar el cuadro de diálogo e Información para presentar la geometría del modelo. Como se ve en la **Figura 3.17**.

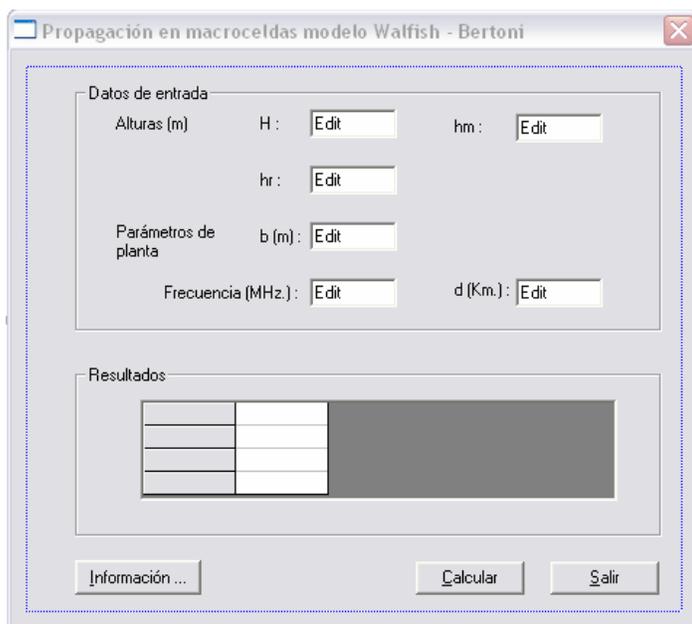


Figura. 3.17. Modelo Walfish-Bertoni

Para realizar los cálculos del modelo Walfish-Bertoni se crea una función en el botón Calcular.

Para observar la geometría del modelo de Walfish-Bertoni se crea un cuadro de diálogo con la geometría del modelo que es llamado desde una función en el botón de Información.



Figura. 3.18. Geometría del modelo Walfish-Bertoni.

3.3.6 Programación del modelo COST-231.

Para el modelo COST-231 se crea un cuadro de diálogo con los siguientes parámetros de entrada: alturas h_b , h_r , h_m , en metros; W y b en metros, Φ en grados, frecuencia f en MHz., distancia d en Km., un botón Calcular para realizar los cálculos, un botón Información para mostrar la geometría del modelo, un botón Salir para cerrar el cuadro de diálogo, una grilla para presentar los resultados en pantalla y dos RadioButton para elegir si es una ciudad pequeña y grande. Como se observa en la **Figura 3.19**.

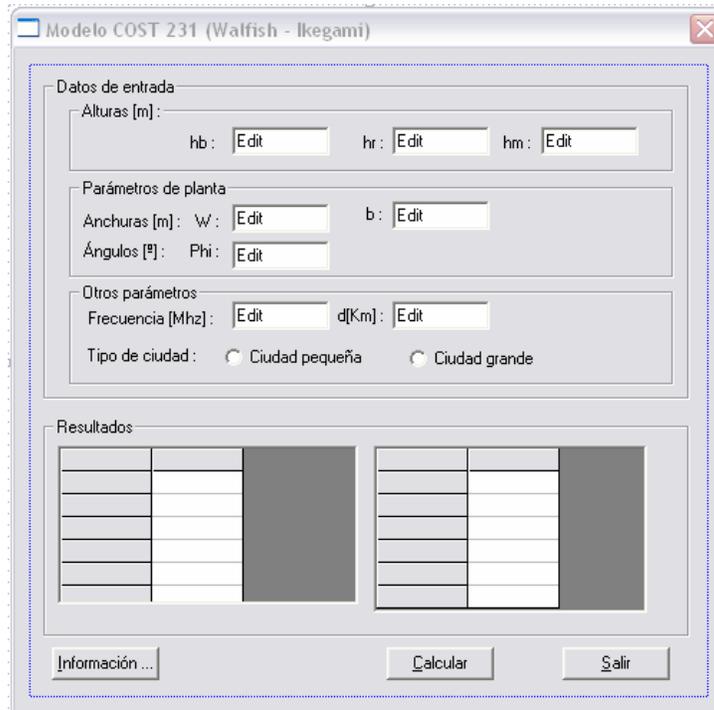


Figura. 3.19. Modelo COST -231.

Para realizar los cálculos del modelo COST-231 creamos una función en el botón Calcular. Dependiendo del Radio Button seleccionado por el usuario, se toma una función para una ciudad pequeña o grande, para esto se crea funciones en los dos Radio Button.

Para observar la geometría del modelo de COST-231 se crea un cuadro de diálogo con la geometría del modelo que es llamado desde una función en el botón de Información.

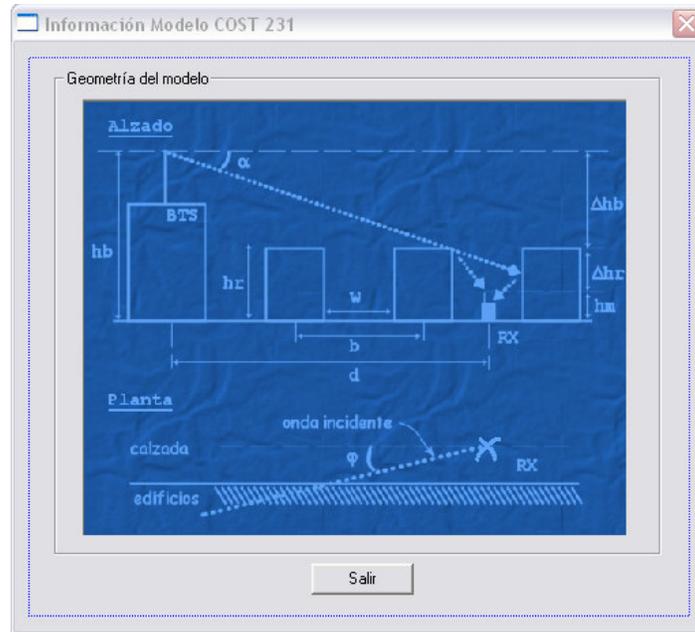


Figura 3.20. Geometría del modelo COST-231.

3.4 PROGRAMACIÓN DEL SIMULADOR DEL CANAL MÓVIL

Para simular el canal móvil se va a utilizar el modelo de dispersores explicado en el capítulo 2, por lo que se ha creado un nuevo cuadro de diálogo con los parámetros de entrada necesarios para poder realizar la simulación de este modelo, los parámetros son los siguientes: número de dispersores, velocidad del móvil en Km/h, frecuencia de la portadora en MHz, longitud recorrida en metros, valor medio del retardo de los rayos en us, valor medio de la potencia del primer rayo en dBW, valor medio de la potencia entre el primer y último rayo en dB, un botón Simular Canal para realizar la simulación del canal móvil, un botón para regresar e ingresar otros parámetros, una grilla para mostrar los datos de los dispersores en pantalla y una grilla para mostrar los parámetros de simulación. Como se ve en la **Figura 3.21**.

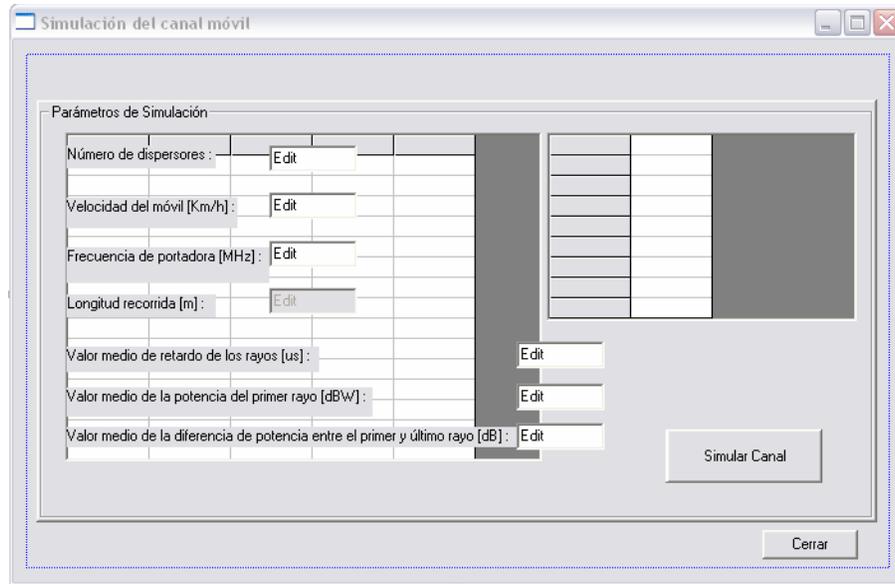


Figura 3.21. Simulador del canal móvil.

3.4.1. Programación del modelo de dispersores.

Para realizar la simulación con el modelo de dispersores se presiona el botón Simular Canal en el cuál se ha creado una función con las fórmulas necesarias. Además se crea una función para volver a ingresar los parámetros de simulación y realizar una nueva simulación para esto se crea una función en el botón Nueva Simulación.

3.4.2 Programación de funciones del sistema.

Las funciones del sistema que se grafican mediante el software en la parte de la simulación del canal móvil fueron escogidas porque son las que mas interés tienen para el análisis, diseño, y simulación de sistemas de comunicaciones móviles, por lo tanto ayudarán al usuario del programa a tener mayor capacidad de visualización de un entorno móvil.

Las funciones del sistema programadas en el software son las siguientes: Amplitud relativa al LOS, fase de la señal recibida, módulo respuesta en frecuencia del canal TVTF, módulo del espectro de la señal recibida, perfil retardo-potencia PDP, level crossings rate LCR, average duration of fades ADF y densidad espectral de frecuencia.

Los gráficos en el software se programan mediante un control ActiveX de Visual C++ denominado MSChart Control el cual permite realizar cualquier tipo de gráficos tanto

matemáticos como estadísticos, en el caso del programa de simulación del canal móvil los gráficos son del tipo línea.

3.4.2.1 Programación del gráfico para la amplitud relativa al LOS.

Este cuadro de diálogo grafica la señal resultante que recibe el usuario móvil, para obtener el gráfico se crea un nuevo cuadro de diálogo en el cuál se añade un control MSChart y dos botones para realizar zoom in y zoom out del gráfico resultante, además se suprime el botón Aceptar y el botón Cancelar se lo renombra como Cerrar. Se configura el control MSChart para que realice un gráfico de línea, se inserta tanto los título del gráfico como de los ejes y se configuran las propiedades adecuadamente. El cuadro de diálogo con los controles se puede observar en la **Figura 3.22**.

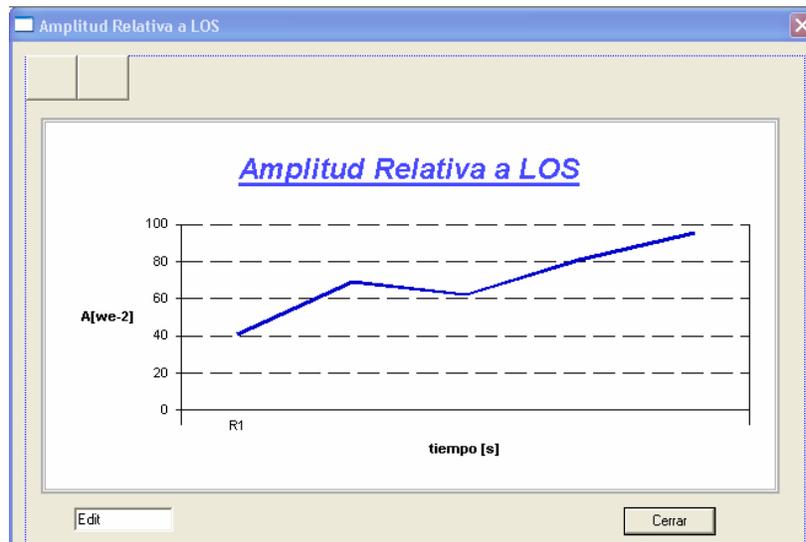


Figura. 3.22. Cuadro de diálogo Amplitud relativa a LOS.

Para realizar el gráfico de la amplitud relativa al LOS se traen los datos de las potencias de los diferentes rayos que llegan al usuario móvil y se suman, después se grafican con el código que se inserta en la función OnInitDialog() del cuadro de diálogo Amplitud relativa a LOS.

Para realizar los zoom in y el zoom out del gráfico se crean dos funciones en los dos botones del cuadro de diálogo haciendo doble click en cada uno de ellos.

3.4.2.2 Programación del gráfico para la fase de la señal recibida.

Este cuadro de diálogo grafica la fase de la señal resultante que recibe el usuario móvil, para obtener el gráfico se crea un nuevo cuadro de diálogo en el cuál se añade un control MSChart y dos botones para realizar zoom in y zoom out del gráfico resultante, además se suprime el botón Aceptar y el botón Cancelar se lo renombra como Cerrar. Se configura el control MSChart para que realice un gráfico de línea, se inserta tanto los título del gráfico como de los ejes y se configuran las propiedades adecuadamente. El cuadro de diálogo con los controles se puede observar en la **Figura 3.23**.

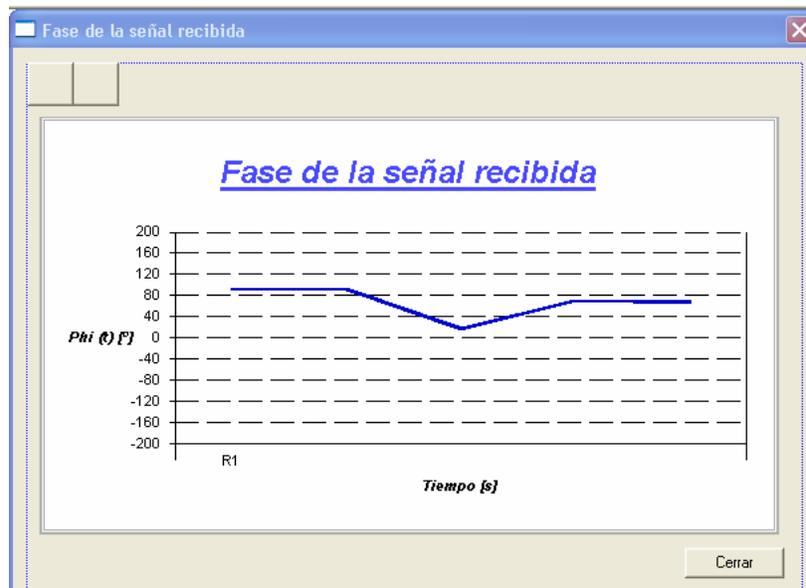


Figura. 3.23. Cuadro de diálogo Fase de la señal recibida.

Para realizar el gráfico de la fase de la señal recibida se usa el código que se inserta en la función OnInitDialog() del cuadro de diálogo Fase de la señal recibida.

Para realizar los zoom in y el zoom out del gráfico se crean dos funciones en los dos botones del cuadro de diálogo haciendo doble click en cada uno de ellos.

3.4.2.3 Programación del gráfico para el módulo respuesta en frecuencia del canal TVTF.

Este cuadro de diálogo grafica el módulo respuesta del canal TVTF, para obtener el gráfico se crea un nuevo cuadro de diálogo en el cuál se añade un control MSChart y dos

botones para realizar zoom in y zoom out del gráfico resultante, además se suprime el botón Aceptar y el botón Cancelar se lo renombra como Cerrar. Se configura el control MSChart para que realice un gráfico de línea, se inserta tanto los título del gráfico como de los ejes y se configuran las propiedades adecuadamente. El cuadro de diálogo con los controles se puede observar en la **Figura 3.24**.

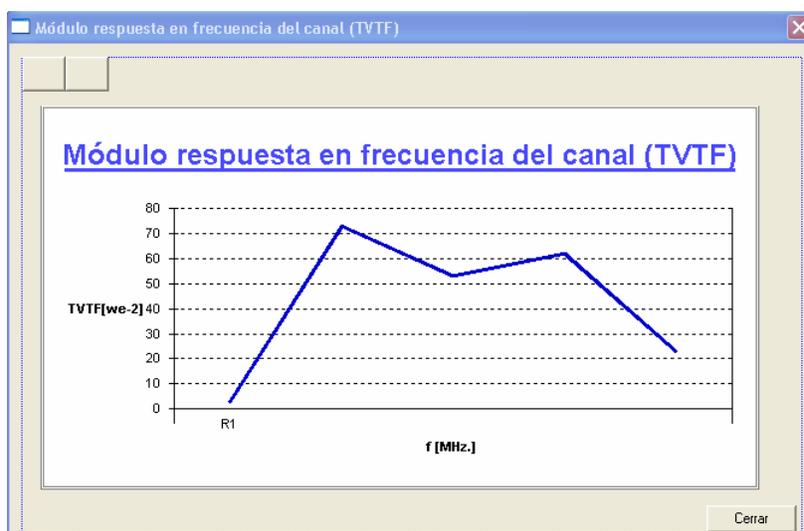


Figura 3.24. Cuadro de diálogo módulo respuesta en frecuencia del canal.

Para realizar el gráfico del TVTF se traen los datos de las señales de cada uno de los diferentes rayos que llegan al usuario móvil y se suman pero sin contar con la frecuencia doppler, después se grafican con el código que se inserta en la función OnInitDialog() del cuadro de diálogo TVTF.

Para realizar los zoom in y el zoom out del gráfico se crean dos funciones en los dos botones del cuadro de diálogo haciendo doble click en cada uno de ellos.

3.4.2.4 Programación del gráfico para el espectro de la señal recibida.

Para graficar el espectro de la señal recibida se ha usado Matlab como herramienta auxiliar y específicamente la función FFT, se ha utilizado el mecanismo Add-inn disponible en Visual C++ para pasar la función fft de matlab a código C. Para esto se crea un archivo .m en Matlab llamado MyFunc.m con una función que tiene el código siguiente:

```
function out=MyFunc(In1)
%Retorna el modulo de fft del vector IN1
out=abs(fft(In1));
```

Esta función se copia en la carpeta del proyecto cccorpmobile y se realiza el procedimiento de adjuntar el archivo .m mediante la barra de herramientas Add-inn disponible en Visual C++ presionando el botón .m++:



Figura. 3.25. Barra de herramientas Add-inn

Mediante este procedimiento se puede utilizar la fft de Matlab en cualquier parte del programa llamando la función MyFunc(In1).

Este cuadro de diálogo grafica el espectro de la señal resultante que recibe el usuario móvil, para obtener el gráfico se crea un nuevo cuadro de diálogo en el cuál se añade un control MSChart, se suprime el botón Aceptar y el botón Cancelar se lo renombra como Cerrar. Se configura el control MSChart para que realice un gráfico de línea, se inserta tanto los título del gráfico como de los ejes y se configuran las propiedades adecuadamente. El cuadro de diálogo con los controles se puede observar en la **Figura 3.26**

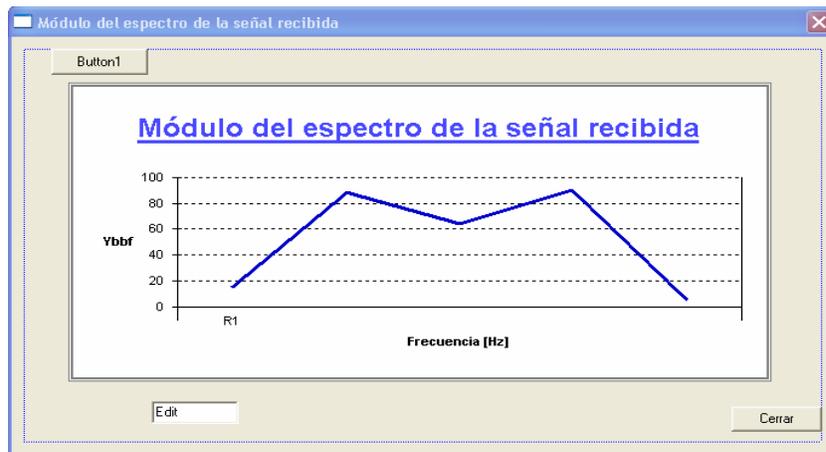


Figura. 3.26. Cuadro de diálogo Módulo del espectro de la señal recibida.

Para realizar el gráfico del espectro de la señal recibida se traen los datos de las potencias de los diferentes rayos que llegan al usuario móvil y se suman para luego obtener la fft, después se grafican con el código que se inserta en la función OnInitDialog() del cuadro de diálogo Módulo del espectro de la señal recibida.

Mediante este código se obtiene el gráfico del espectro de la señal recibida de la simulación del canal móvil de manera óptima.

3.4.2.5 Programación del gráfico para el perfil retardo -potencia.

Este cuadro de diálogo grafica el perfil retardo-potencia de los rayos recibidos por el usuario móvil, para obtener el gráfico se crea un nuevo cuadro de diálogo en el cuál se añade un control MSChart, se suprime el botón Aceptar y el botón Cancelar se lo renombra como Cerrar. Se configura el control MSChart para que realice un gráfico de línea, se inserta tanto los título del gráfico como de los ejes y se configuran las propiedades adecuadamente. El cuadro de diálogo con los controles se puede observar en la **Figura 3.27**.

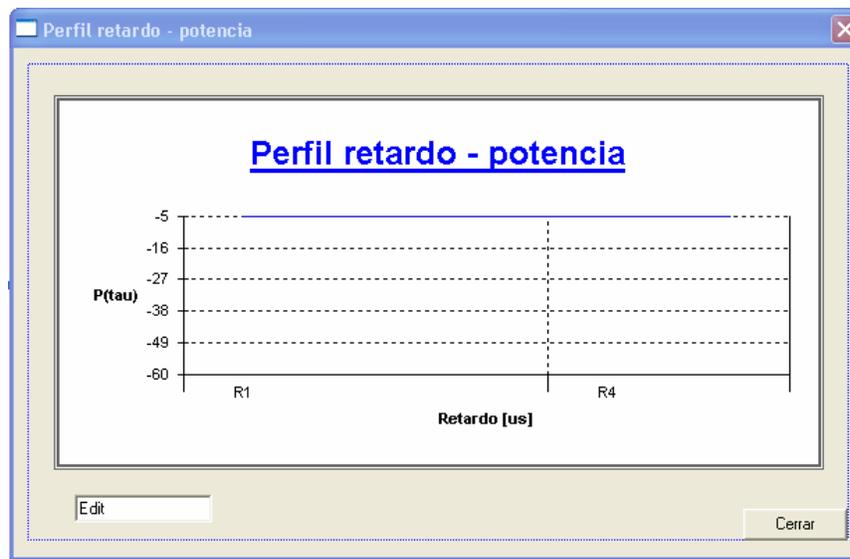


Figura. 3.27. Cuadro de diálogo Perfil retardo-potencia.

Para realizar el gráfico del perfil retardo-potencia se traen los datos de las potencias de los diferentes rayos que llegan al usuario móvil así como los retardos de cada uno de los

rayos y se ordenan, después se grafican con el código que se inserta en la función OnInitDialog() del cuadro de diálogo Perfil retardo-potencia.

3.4.2.6 Programación del gráfico para level crossings rate LCR.

Este cuadro de diálogo grafica el LCR , para obtener el gráfico se crea un nuevo cuadro de diálogo en el cuál se añade un control MSChart, se suprime el botón Aceptar y el botón Cancelar se lo renombra como Cerrar. Se configura el control MSChart para que realice un gráfico de línea, se inserta tanto los título del gráfico como de los ejes y se configuran las propiedades adecuadamente. El cuadro de diálogo con los controles se puede observar en la **Figura 3.28**.

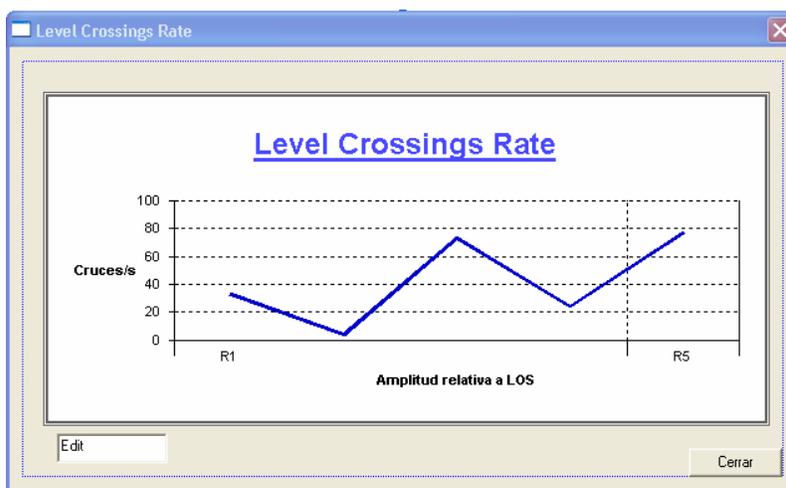


Figura. 3.28. Cuadro de diálogo Level crossings rate.

Para realizar el gráfico del LCR se traen los datos de las potencias de los diferentes rayos y se ordenan, después se grafican con el código que se inserta en la función OnInitDialog() del cuadro de diálogo Level crossings rate.

3.4.2.7 Programación del gráfico para average duration of fades ADF.

Este cuadro de diálogo grafica el ADF, para obtener el gráfico se crea un nuevo cuadro de diálogo en el cuál se añade un control MSChart, se suprime el botón Aceptar y el botón Cancelar se lo renombra como Cerrar. Se configura el control MSChart para que realice un gráfico de línea, se inserta tanto los título del gráfico como de los ejes y se configuran las

propiedades adecuadamente. El cuadro de diálogo con los controles se puede observar en la **Figura 3.29**.

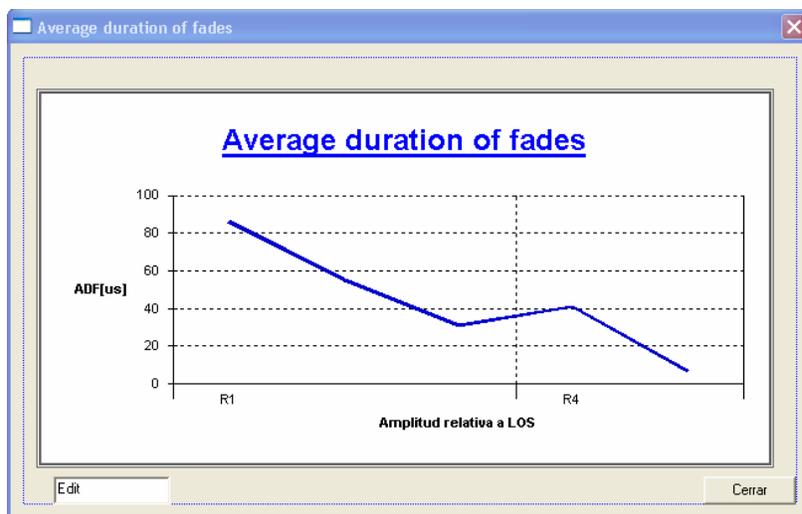


Figura .3.29. Cuadro de diálogo Average duration of fades.

Para realizar el gráfico del ADF se traen los datos de las potencias de los diferentes rayos y se ordenan, después se grafican con el código que se inserta en la función `OnInitDialog()` del cuadro de diálogo `Average duration of fades`.

3.4.2.8 Programación del gráfico para la densidad espectral de frecuencia.

Este cuadro de diálogo grafica la densidad espectral de frecuencia, para obtener el gráfico se crea un nuevo cuadro de diálogo en el cuál se añade un control `MSChart`, se suprime el botón `Aceptar` y el botón `Cancelar` se lo renombra como `Cerrar`. Se configura el control `MSChart` para que realice un gráfico de línea, se inserta tanto los título del gráfico como de los ejes y se configuran las propiedades adecuadamente. El cuadro de diálogo con los controles se puede observar en la **Figura 3.30**.

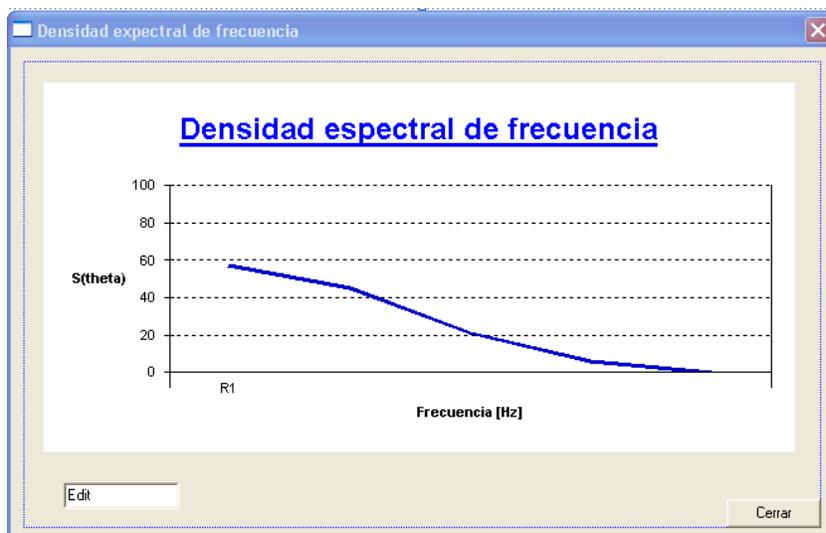


Figura. 3.30. Cuadro de diálogo densidad espectral de frecuencia.

Para realizar el gráfico de la densidad espectral de frecuencia se traen los datos de las potencias de los diferentes rayos, después se grafican con el código que se inserta en la función OnInitDialog() del cuadro de diálogo densidad espectral de frecuencia.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL SOFTWARE DE MODELOS DE PROPAGACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CANAL MÓVIL

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA MICROCELDAS

Para analizar los resultados obtenidos para los modelos de propagación para microceldas se van a usar las frecuencias de 850 MHz y 1900 MHz para cada modelo. En cada uno de los modelos de propagación existe un amplio rango en los que pueden variar los datos de entrada por lo que se puede usar gran cantidad de combinaciones de variables de entrada, es por esto que se dará apenas unos ejemplos de lo que el programa es capaz de hacer, por lo tanto es el usuario quien puede probar diferentes valores de datos de entrada y puede obtener resultados según su necesidad.

4.1.1 Análisis de resultados para los modelos LOS.

Para entrar a la parte de modelos LOS del programa se hace click en en el menú Propagación en Microceldas, seguidamente se apunta con el Mouse la opción Modelos LOS, así podemos observar las opciones de los dos modelos LOS disponibles en el software, el modelo de Lund y el modelo UIT-R 8/1. **Figura 4.1.**

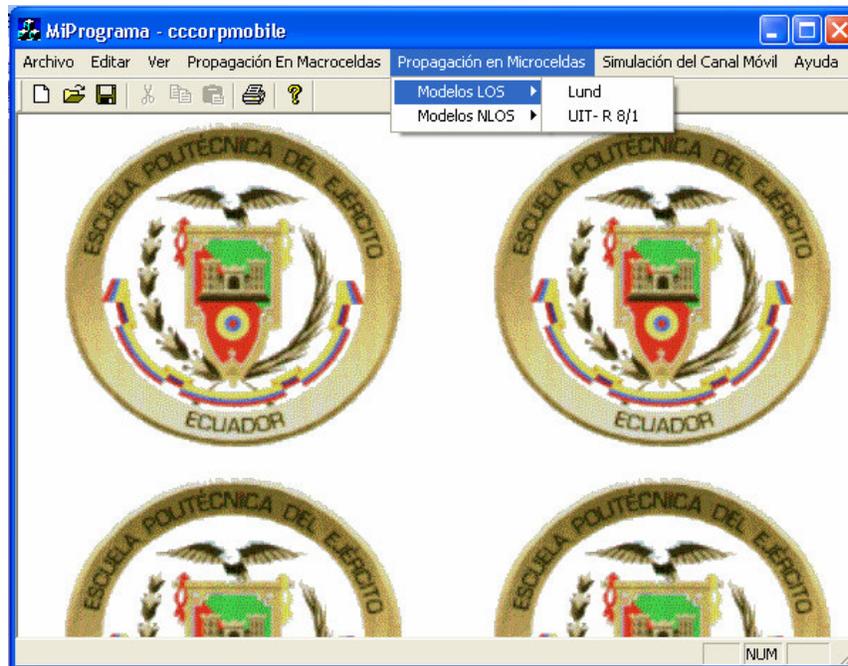
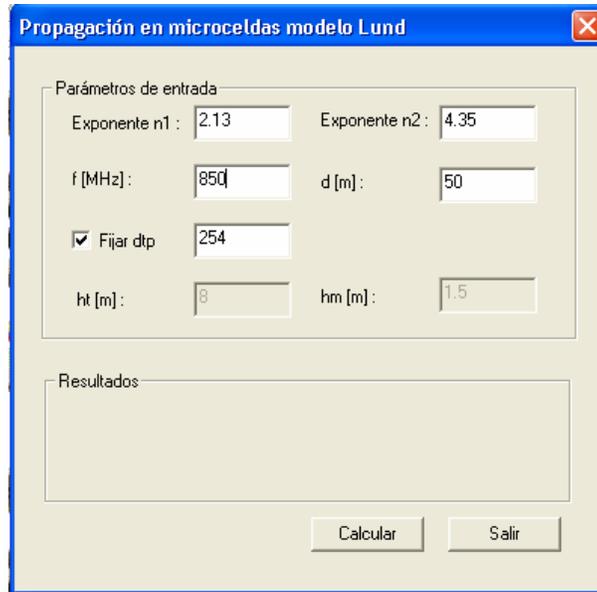


Figura. 4.1. Modelos LOS.

4.1.1.1 Análisis de resultados para el modelo Lund.

Para trabajar con el modelo Lund se elige la opción Lund en los modelos LOS del menú Propagación en Microceldas del programa, aparecerá entonces el cuadro de diálogo Propagación en microceldas modelo de Lund que permitirá obtener las pérdidas de propagación usando el modelo de Lund explicado en el capítulo 2. El cuadro de diálogo permite ingresar las variables de entrada siguientes: exponentes n_1 y n_2 , frecuencia, distancia, d_{tp} , h_t y h_m . Como el punto d_{tp} se calcula mediante las alturas h_t y h_m el programa permite la opción de fijar un d_{tp} específico o calcularlo mediante h_t y h_m , esto se realiza habilitando o deshabilitando el Check box Fijar d_{tp} .

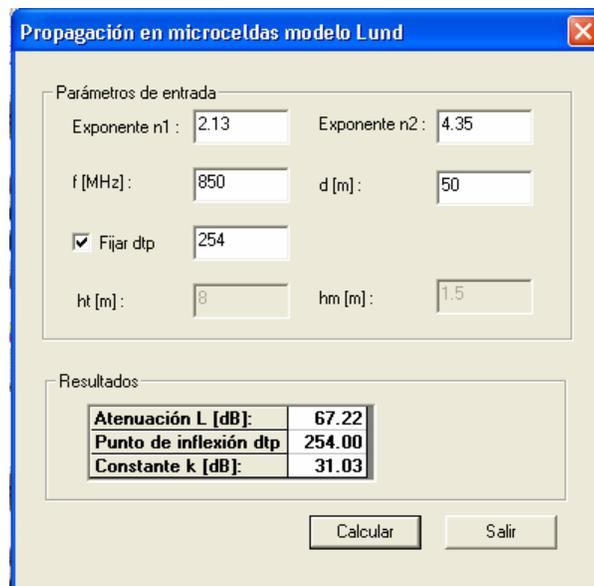
Para el primer ejemplo de análisis se ingresa los siguientes valores en las variables de entrada siguientes: exponente $n_1=2.13$, exponente $n_2=4.35$, frecuencia $f=850$ MHz, distancia $d=50$ metros, se fija un $d_{tp}=254$ por lo que los cuadros de edición de las alturas h_t y h_m quedan deshabilitados como se ve en la **Figura 4.2**.



The screenshot shows a software dialog box titled "Propagación en microceldas modelo Lund". It contains a section for "Parámetros de entrada" with the following fields: "Exponente n1" (2.13), "Exponente n2" (4.35), "f [MHz]" (850), "d [m]" (50), a checked "Fijar dtp" checkbox with a value of 254, "ht [m]" (8), and "hm [m]" (1.5). Below this is a "Resultados" section which is currently empty. At the bottom are "Calcular" and "Salir" buttons.

Figura. 4.2. Ingreso de variables de entrada para el modelo Lund.

Se presiona el botón Calcular y se obtiene los datos de las pérdidas totales L en dB, el punto de inflexión dtp y la constante k en dB, de la propagación de una microcelda caracterizada por las variables de entrada. Se obtiene una pérdida total $L=67.22$ dB, un punto de inflexión $dtp=254$ y una constante $k=31.03$ dB. **Figura 4.3.**



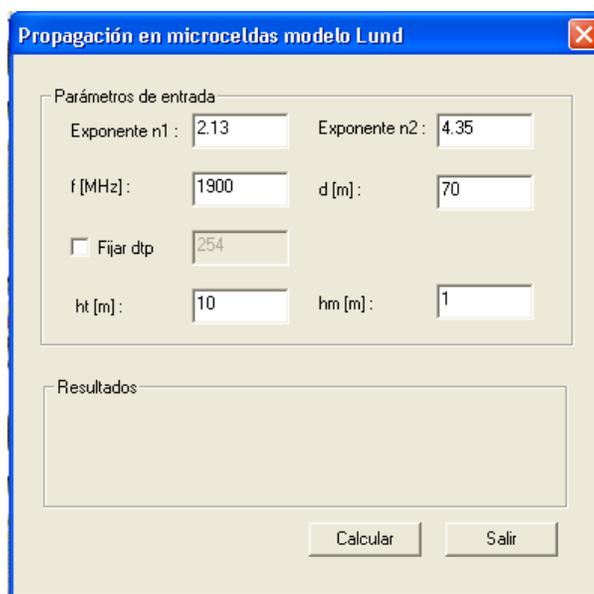
The screenshot shows the same dialog box as in Figure 4.2, but now the "Resultados" section contains a table with the following data:

Atenuación L [dB]:	67.22
Punto de inflexión dtp	254.00
Constante k [dB]:	31.03

The "Calcular" and "Salir" buttons are still visible at the bottom.

Figura. 4.3. Resultados para el modelo Lund.

Para el segundo ejemplo de análisis se ingresa los siguientes valores en las variables de entrada siguientes: exponente $n_1=2.13$, exponente $n_2=4.35$, frecuencia $f=1900$ MHz, distancia $d=70$ metros, no se fija un d_{tp} por lo que los cuadros de edición de las alturas h_t y h_m quedan habilitados para ingresar los valores de $h_t=10$ metros y $h_m=1$ metro como se ve en la **Figura 4.4**.



The screenshot shows a software window titled "Propagación en microceldas modelo Lund". The window contains a form for inputting parameters. The "Parámetros de entrada" section includes the following fields and values:

Variable	Value
Exponente n_1	2.13
Exponente n_2	4.35
f [MHz]	1900
d [m]	70
Fijar dtp	<input type="checkbox"/>
ht [m]	10
hm [m]	1

Below the input fields is a "Resultados" section with a large empty text area. At the bottom of the window are two buttons: "Calcular" and "Salir".

Figura 4.4. Ingreso de variables de entrada modelo Lund.

Se presiona el botón Calcular y obtenemos los datos de las pérdidas totales L en dB, el punto de inflexión d_{tp} y la constante k en dB, de la propagación de una microcelda caracterizada por las variables de entrada. Se obtiene una pérdida total $L=77.32$ dB, un punto de inflexión $d_{tp}=253.33$ y una constante $k=38.02$ dB. **Figura 4.5**.

Propagación en microceldas modelo Lund

Parámetros de entrada

Exponente n1 : 2.13 Exponente n2 : 4.35

f [MHz] : 1900 d [m] : 70

Fijar dtp 254

ht [m] : 10 hm [m] : 1

Resultados

Atenuación L [dB]:	77.32
Punto de inflexión dtp	253.33
Constante k [dB]:	38.02

Calcular Salir

Figura. 4.5. Resultados modelo Lund.

4.1.1.2 Análisis de resultados para el modelo UIT-R 8/1.

Para trabajar con el modelo UIT-R 8/1 se da click en el botón UIT-R 8/1, en el submenú modelos LOS, del menú Propagación en microceldas. Aparece entonces el cuadro de diálogo, Propagación en microceldas modelo UIT-R 8/1, que permite hallar las pérdidas de propagación mediante el modelo UIT-R 8/1 explicado en el capítulo 2. El cuadro de diálogo permite ingresar las variables siguientes: frecuencia en MHz, distancia en metros, dtp y alturas hm y ht en metros. Como el dtp se calcula mediante las alturas hm y ht, el programa permite fijar dtp directamente o calcularlo mediante las alturas hm y ht, esto se realiza habilitando o deshabilitando el Check box Fijar dtp.

Para el primer ejemplo se ingresan los siguientes valores en las variables de entrada: frecuencia $f=1900$ MHz, distancia $d=50$ m, $dtp=254$. **Figura 4.6.**

Figura. 4.6. Ingreso de variables de entrada modelo UIT-R 8/1.

Al presionar el botón Calcular se obtienen el punto de inflexión dtp y las pérdidas totales L en dB, de una microcelda caracterizada por las variables de entrada. En este caso se obtienen un punto de inflexión dtp=254, y las pérdidas totales L=82.47 dB. **Figura 4.7.**

Atenuación L [dB]:	82.47
Punto de inflexión dtp [m]:	254.00

Figura. 4.7. Resultados para el modelo UIT-R 8/1.

Para el segundo ejemplo se ingresan en las variables de entrada los valores siguientes: frecuencia f=850 MHz, distancia d=75 m, se deshabilita fijar dtp y se ingresan en los cuadros de las alturas los valores de ht=10 m, y hm=2 m. **Figura 4.8.**

Propagación en microceldas modelo UIT -R 8/1

Parámetros de entrada

f [MHz]: 850 d [m]: 75

Fijar dtp 254

ht [m]: 10 hm [m]: 2

Resultados

Calcular Salir

Figura. 4.8. Ingreso de variables de entrada modelo UIT-R 8/1.

Al presionar el botón Calcular se obtienen el punto de inflexión dtp y las pérdidas totales L en dB, de una microcelda caracterizada por las variables de entrada. En este caso se obtienen un punto de inflexión dtp=226.67, y las pérdidas totales L=86.88 dB. **Figura 4.9.**

Propagación en microceldas modelo UIT -R 8/1

Parámetros de entrada

f [MHz]: 850 d [m]: 75

Fijar dtp 254

ht [m]: 10 hm [m]: 2

Resultados

Atenuación L [dB]:	86.88
Punto de inflexión dtp [m]:	226.67

Calcular Salir

Figura.4.9. Resultados modelo UIT-R 8/1.

4.1.2 Análisis de resultados para los modelos NLOS.

Para entrar a la parte de modelos NLOS del programa se hace click en en el menú Propagación en Microceldas, seguidamente se apunta con el Mouse la opción Modelos LOS, así podemos observar las opciones de los dos modelos NLOS disponibles en el software, el modelo COST-231 Lund y el modelo Dresde. **Figura 4.10.**

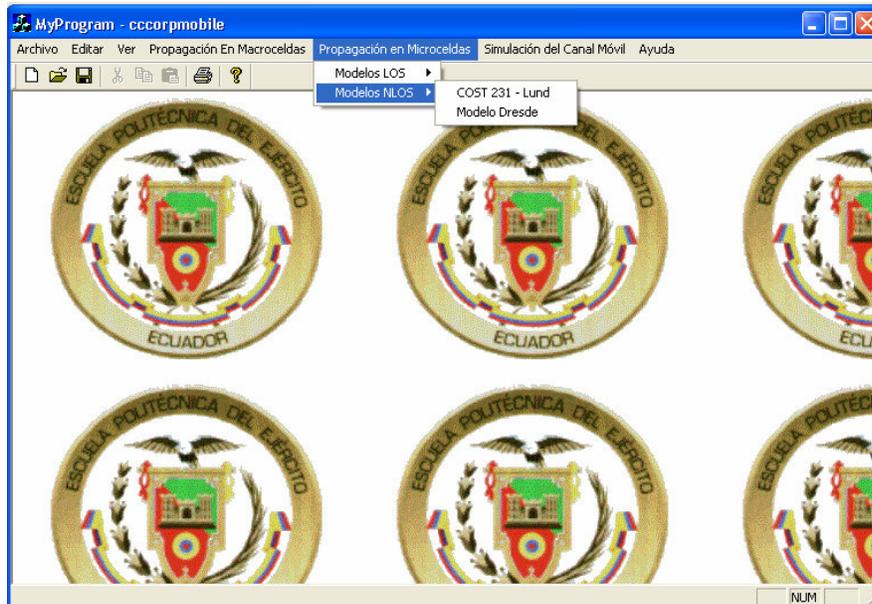


Figura 4.10. Modelos NLOS.

4.1.2.1 Análisis de resultados para el modelo COST 231 Lund.

Para trabajar con el modelo COST 231 Lund se presiona el botón COST 231-Lund ubicado en el menú propagación en microceldas, submenú modelos NLOS, aparece el cuadro de diálogo Propagación en microceldas modelo COST-231-Lund mediante el cual se puede calcular las pérdidas de propagación utilizando el modelo COST 231 Lund explicado en el capítulo 2. El cuadro de diálogo permite ingresar las siguientes variables de entrada: distancias x , y en metros, anchuras w_1 , w_d en metros, mediante el check box Pérdidas LOS se pueden ingresar directamente las pérdidas LOS en el cuadro de edición o se puede elegir calcular las pérdidas LOS mediante los modelos Lund o UIT-R 8/1. Para el primer ejemplo se ingresan los siguientes valores en las variables de entrada: $x=50$ m $y=40$ m, $w_d=10$ m, $w_1=10$ m, pérdidas LOS 73.74 dB. **Figura 4.11.**

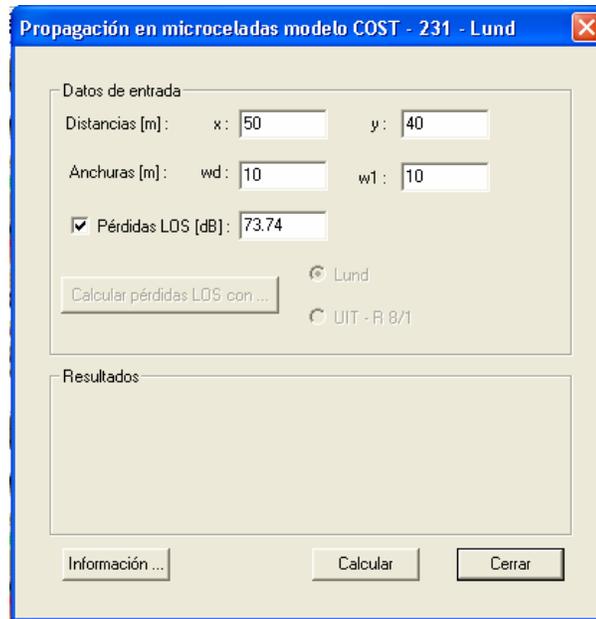


Figura. 4.11. Ingreso de datos modelo COST 231 Lund

Al presionar el botón Calcular se obtienen los resultados siguientes: distancias y_0 , y_1 , y_2 en metros, ángulo ϕ en radianes, atenuaciones LOS, NLOS y pérdidas totales en dB. En este caso los resultados son los siguientes: $y_0=3.89$ m, $y_1= 7.81$ m, $y_2=11.1$ m, $\phi=0.24$ radianes, pérdidas LOS= 73.74 dB, $L(y)=27.81$ dB y pérdidas totales $L_t=101.55$ dB. **Figura 4.12.**

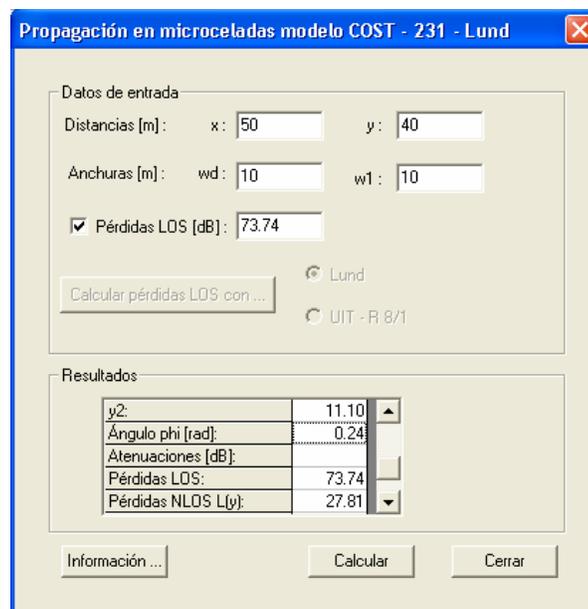


Figura. 4.12. Resultados modelo COST 231 Lund.

Para el segundo ejemplo se ingresarán las variables de entrada siguientes: $x=25$ m $y=20$ m, $w_d=5$ m, $w_l=5$ m, en este ejemplo se calcularán las pérdidas LOS con el modelo Lund así se deshabilita el check box Pérdidas LOS. **Figura 4.13.**

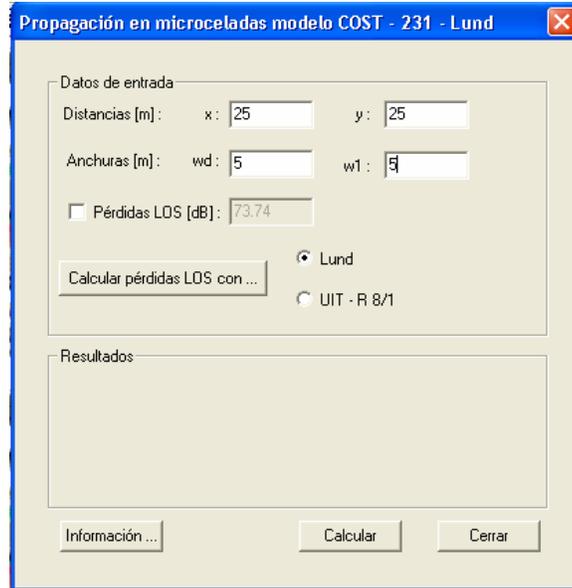


Figura .4.13. Ingreso de variables de entrada modelo COST 231 Lund.

Al presionar el botón Calcular pérdidas LOS con aparece el cuadro de diálogo de las pérdidas de propagación modelo Lund, en este caso se dejan los datos por defecto. **Figura 4.14.**

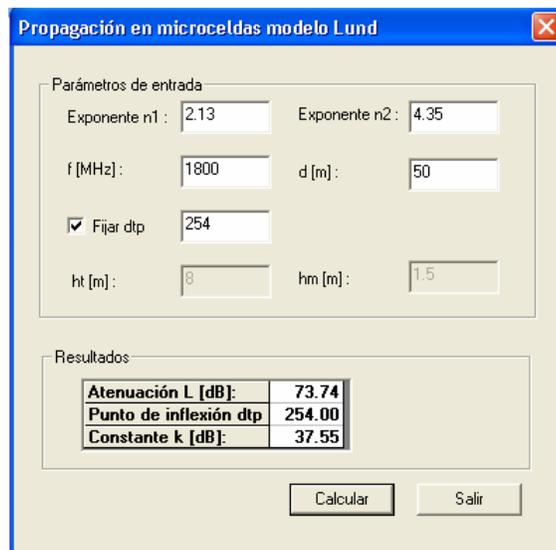


Figura. 4.14. Modelo Lund.

Al presionar el botón Calcular se obtienen los resultados siguientes: distancias y_0 , y_1 , y_2 en metros, ángulo ϕ en radianes, atenuaciones LOS, NLOS y pérdidas totales en dB. En este caso los resultados son los siguientes: $y_0=3.89$ m, $y_1= 6.71$ m, $y_2=8$ m, $\phi=0.24$ radianes, pérdidas LOS= 73.73 dB, $L(y)=22.22$ dB y pérdidas totales $L_t=95.94$ dB. **Figura 4.15.**

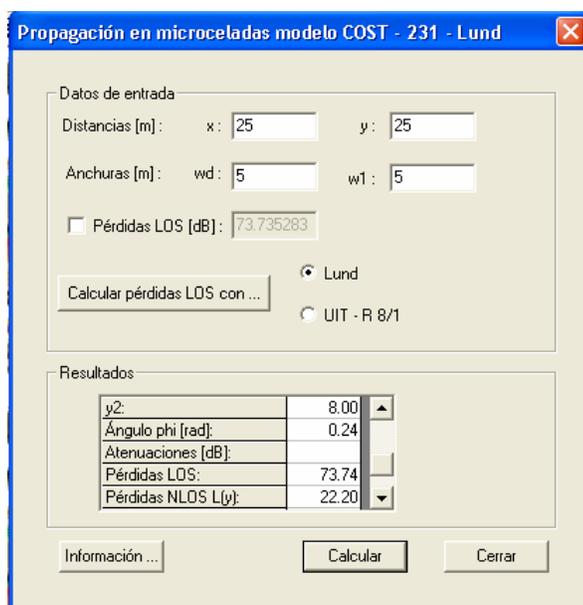


Figura. 4.15. Resultados modelo COST 231 Lund.

Al presionar el botón Información se puede observar la geometría del modelo COST 231 Lund. **Figura 4.16.**



Figura. 4.16. Información del modelo COST 231 Lund.

4.1.2.2 Análisis de resultados para el modelo Dresde.

Para trabajar con el modelo Dresde se presiona el botón Dresde ubicado en el menú propagación en microceldas, submenú modelos NLOS, aparece el cuadro de diálogo Propagación en microceldas modelo Dresde mediante el cual se puede calcular las pérdidas de propagación utilizando el modelo Dresde explicado en el capítulo 2. El cuadro de diálogo permite ingresar las siguientes variables de entrada: distancias x , y en metros, anchuras w_1 , w_d en metros y frecuencia en MHz. Para el primer ejemplo se ingresan los siguientes valores en las variables de entrada: $x=50$ m $y=40$ m, $w_d=10$ m, $w_1=10$ m y frecuencia 850 MHz. **Figura 4.17.**

The dialog box titled "Propagación en microceldas modelo Dresde" contains the following input fields:

- Datos de entrada:
 - Distancias [m]: x: 50, y: 40
 - Anchuras [m]: wd: 10, w1: 10
 - Frecuencia [Mhz]: 850
- Resultados: (Empty text area)
- Buttons: Información..., Calcular, Cerrar

Figura. 4.17. Ingreso de variables de entrada para el modelo Dresde.

Al presionar el botón Calcular se obtienen los resultados siguientes: distancias s , s' en metros, ángulos ϕ , ϕ' en radianes, pérdidas en la difracción de la esquina L_c , pérdidas en el espacio libre L_{bf} y pérdidas totales L_t en dB. En este caso los resultados son los siguientes: $\phi' = 0.24$ rad, $\phi = 4.39$ rad, $s' = 41.93$ m, $s = 31.62$ m, $L_c = 75.03$ dB, $L_{bf} = 31.03$ dB, $L_t = 106.06$ dB. **Figura 4.18.**

The dialog box titled "Propagación en microceldas modelo Dresde" shows the following results in a table:

s :	31.62
Atenuaciones [dB]:	
Pérdidas en la difracción de la esquina, L_c :	75.03
Pérdidas en el espacio libre, L_{bf} :	31.03
Pérdidas totales, L_t :	106.06

Buttons: Información..., Calcular, Cerrar

Figura. 4.18. Resultados modelo Dresde.

Para el segundo ejemplo se ingresan los siguientes valores en las variables de entrada: $x=25$ m, $y=20$ m, $w_d=5$ m, $w_1=5$ m y frecuencia 1900 MHz. **Figura 4.19.**

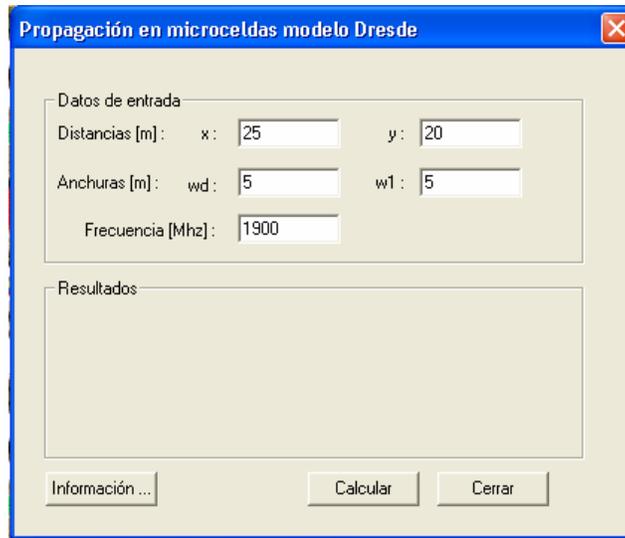


Figura. 4.19. Ingreso de datos modelo Dresde.

Al presionar el botón Calcular se obtienen los resultados siguientes: distancias s , s' en metros, ángulos ϕ , ϕ' en radianes, pérdidas en la difracción de la esquina L_c , pérdidas en el espacio libre L_{bf} y pérdidas totales L_t en dB. En este caso los resultados son los siguientes: $\phi'=0.24$ rad, $\phi=4.39$ rad, $s'=20.62$ m, $s=15.81$ m, $L_c=69.49$ dB, $L_{bf}=38.01$ dB, $L_t=107.5$ dB. **Figura 4.20.**

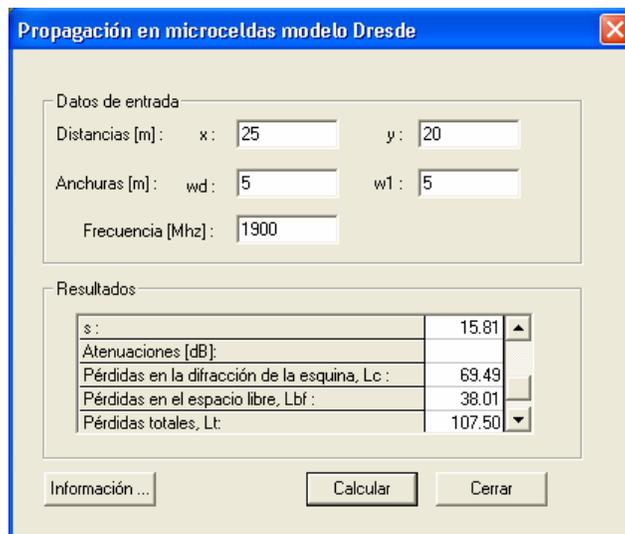


Figura 4.20. Resultados modelo Dresde.

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA MACROCELDAS

Para analizar los resultados obtenidos para los modelos de propagación para microceldas se van a realizar ejemplos del uso del programa con las frecuencias de 850 MHz y 1900 MHz para cada modelo. En cada uno de los modelos de propagación existe un amplio rango en los que pueden variar los datos de entrada y diferentes combinaciones de datos entre sí, por lo tanto el usuario puede probar diferentes valores de variables de entrada y puede obtener resultados según su necesidad.

Para entrar a los modelos de macroceldas se da un click en el menú Propagación en Macrocelas del programa cccorpmobile, se puede observar cada uno de los diferentes modelos disponibles para realizar los cálculos de las pérdidas de propagación. **Figura 4.21.**

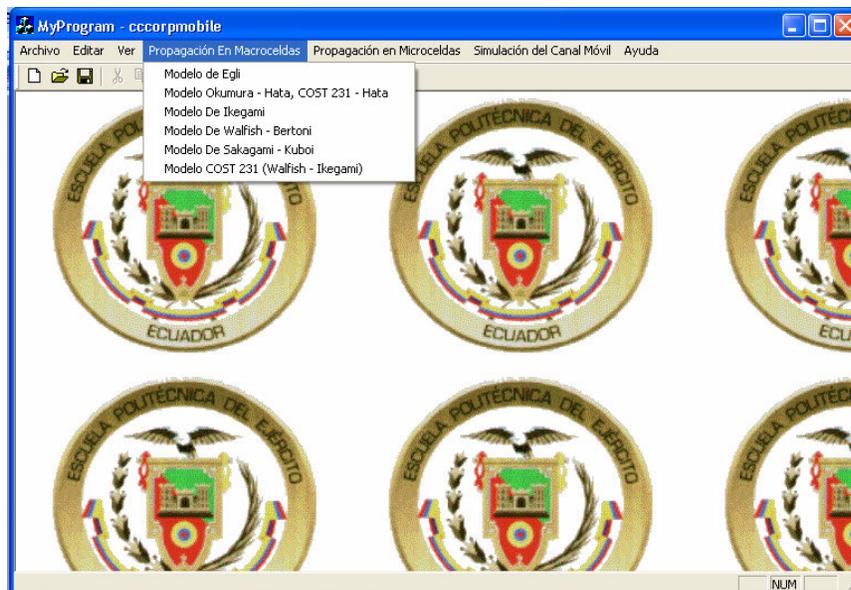


Figura. 4.21. Modelos de propagación para macroceldas.

4.2.1 Análisis de resultados modelo de Egli.

Para trabajar con el modelo de Egli se presiona el botón modelo de Egli en el menú Propagación en Macrocelas del programa, aparece entonces el cuadro de diálogo Propagación en macroceldas modelo de Egli, que calcula las pérdidas de propagación usando el modelo de Egli estudiado en el capítulo 2. El cuadro de diálogo permite ingresar

las variables siguientes: distancia en Km, alturas hb y hm en metros y frecuencia en MHz. Para el primer ejemplo se ingresan los datos siguientes en el cuadro de diálogo: d=5 Km, hb=10 m, hm=2 m y frecuencia f=850 MHz. **Figura 4.22.**

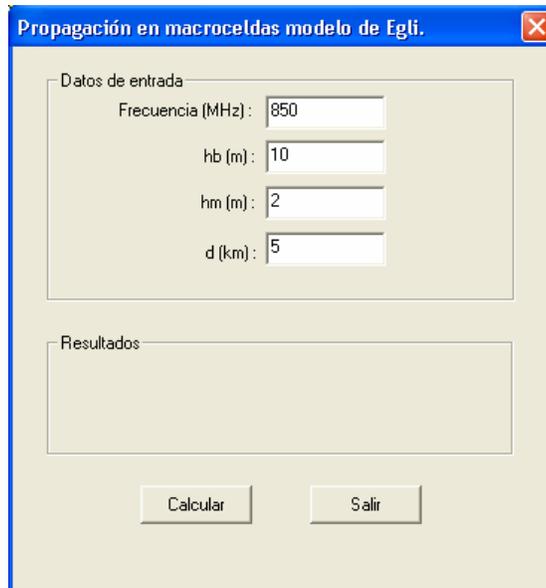


Figura. 4.22. Ingreso de variables de entrada para el modelo de Egli.

Al presionar el botón Calcular se obtienen las pérdidas de propagación para una macrocelda caracterizada por las variables de entrada. En este caso las pérdidas totales son 28.49 dB. **Figura 4.23.**

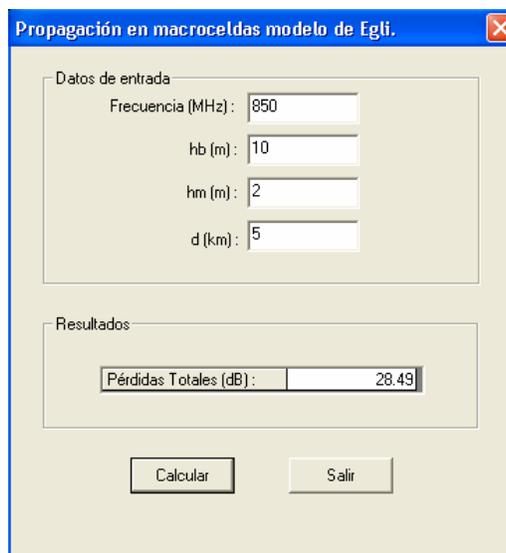
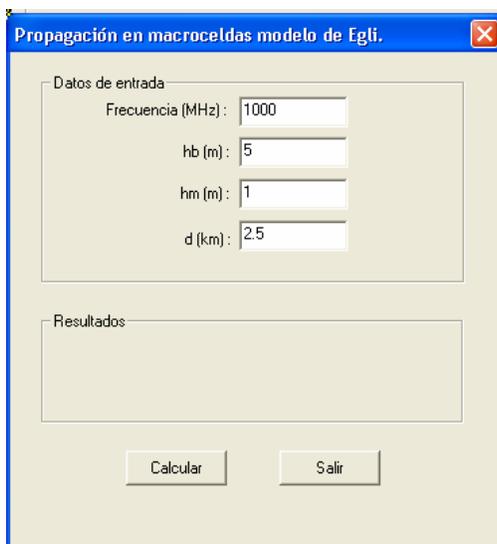


Figura. 4.23. Resultados modelo de Egli.

Para el segundo ejemplo se ingresan los datos siguientes en el cuadro de diálogo: $d=2.5$ Km, $h_b=5$ m, $h_m=1$ m y frecuencia $f=1000$ MHz. **Figura 4.24.**



The image shows a software dialog box titled "Propagación en macroceldas modelo de Egli." with a close button (X) in the top right corner. It contains two main sections: "Datos de entrada" and "Resultados".

Datos de entrada:

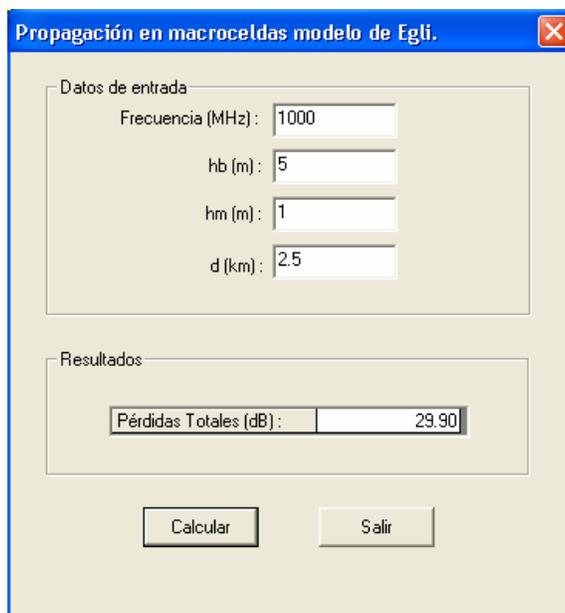
- Frecuencia (MHz): 1000
- h_b (m): 5
- h_m (m): 1
- d (km): 2.5

Resultados:

Below the results section are two buttons: "Calcular" and "Salir".

Figura. 4.24. Ingreso de variables de entrada para el modelo de Egli.

Al presionar el botón Calcular se obtienen las pérdidas de propagación para una macrocelda caracterizada por las variables de entrada. En este caso las pérdidas totales son 29.90 dB. **Figura 4.25.**



The image shows the same software dialog box as in Figure 4.24, but now the "Resultados" section is populated. It contains a text box with the label "Pérdidas Totales (dB):" and the value "29.90".

Datos de entrada:

- Frecuencia (MHz): 1000
- h_b (m): 5
- h_m (m): 1
- d (km): 2.5

Resultados:

Pérdidas Totales (dB): 29.90

Below the results section are two buttons: "Calcular" and "Salir".

Figura. 4.25. Resultados modelo de Egli.

4.2.2 Análisis de resultados para el modelo Okumura-Hata, COST 231-Hata.

Para trabajar con los modelo de Okumura Hata y COST 231-Hata se presiona el botón modelo de Okumura Hata COST 231-Hata en el menú Propagación en Macroceldas del programa, aparece entonces el cuadro de diálogo Propagación en macroceldas modelo de Okumura Hata/COST 231-Hata, que calcula las pérdidas de propagación usando los modelos de Okumura Hata y COST 231-Hata estudiados en el capítulo 2. El cuadro de diálogo permite ingresar las variables de entrada siguientes: frecuencia en MHz, ht en metros, hm en metros y distancia en kilómetros. Permite además realizar las correcciones del entorno móvil, de altura del móvil y del tipo de ciudad. El cuadro de diálogo realiza los cálculos de pérdidas de propagación de frecuencias menores a 1500 MHz con el modelo Okumura-Hata, para frecuencias mayores a 1500 MHz con el modelo COST 231-Hata y para la frecuencia de 1500 MHz el usuario elige el modelo a utilizar. Para el primer ejemplo se ingresan los datos siguientes en las variables de entrada: $f = 850$ MHz, $ht = 30$ m, $hm = 1$ m y $d = 10$ Km. No se realiza ninguna corrección. **Figura 4.26.**

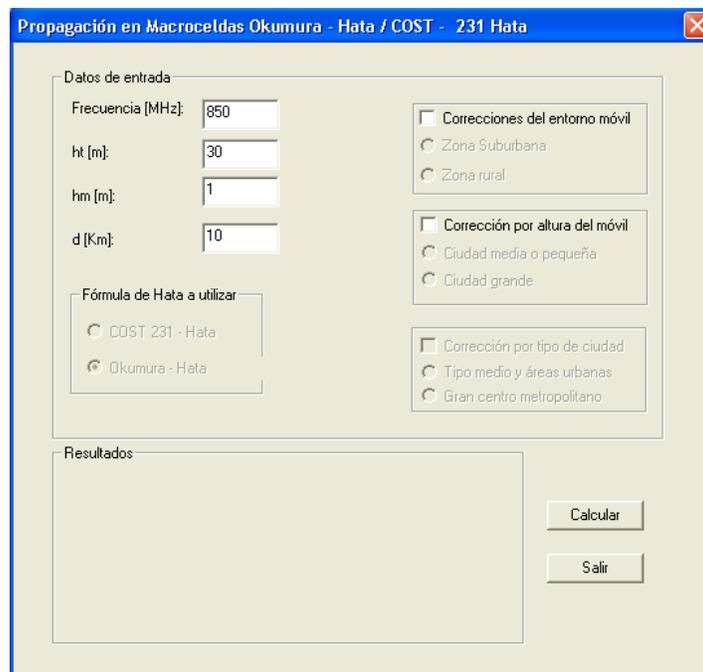


Figura. 4.26. Ingreso de datos para el modelo Okumura-Hata.

Al presionar el botón Calcular se obtienen los resultados siguientes: corrección $a(hm)$ en dB, constante cm , corrección del entorno en dB, pérdida básica en dB y atenuación total corregida, en este caso se tienen los valores siguientes: pérdida básica $L_b = 161.29$ dB y

atenuación total corregida 161.29 dB. Estos valores resultan porque no se realizó ninguna corrección de las sugeridas en el modelo. **Figura 4.27.**

Propagación en Macroceldas Okumura - Hata / COST - 231 Hata

Datos de entrada

Frecuencia [MHz]: 850

ht [m]: 30

hm [m]: 1

d [Km]: 10

Fórmula de Hata a utilizar

COST 231 - Hata

Okumura - Hata

Correcciones del entorno móvil

Zona Suburbana

Zona rural

Corrección por altura del móvil

Ciudad media o pequeña

Ciudad grande

Corrección por tipo de ciudad

Tipo medio y áreas urbanas

Gran centro metropolitano

Resultados

RESULTADOS	
- Corrección, a(htm) [dB]	0.00
- Pérdida básica, Lb [dB]	161.29
- Constante cm [dB] para COST 231 - Hata	0.00
CORRECCIÓN A Lb POR ENTORNO DEL Rx	
- Corrección del entorno [dB]	0.00
- Atenuación total corregida [dB]	161.29

Calcular

Salir

Figura 4.27. Resultados modelo de Hata.

Para el segundo ejemplo se ingresan los resultados siguientes en las variables de entrada: $f=1900$ MHz, $ht=60$ m, $hm=2$ m, $d=20$ Km. Se realiza las siguientes correcciones: para el entorno móvil se escoge Zona Suburbana, por la altura del móvil se escoge Ciudad media o pequeña y por tipo de ciudad se escoge Tipo medio y áreas urbanas. **Figura 4.28.**

Figura 4.28. Ingreso de datos modelo COST 231-Hata

Al presionar el botón Calcular se obtienen los resultados siguientes: corrección $a(hm)$ en dB, constante cm , corrección del entorno en dB, pérdida básica en dB y atenuación total corregida, en este caso se tienen los valores siguientes: $a(hm)=1.5$ dB, pérdida básica $L_b=174.64$ dB, $cm=0$ dB, corrección del entorno suburbano -12.11 dB, atenuación corregida 162.53 dB. **Figura 4.29.**

RESULTADOS	
- Corrección, $a(hm)$ [dB]	1.50
- Pérdida básica, L_b [dB]	174.64
- Constante cm [dB] para COST 231 - Hata	0.00
CORRECCIÓN A L_b POR ENTORNO DEL Rx	
- Corrección del entorno suburbano [dB]	-12.11
- Atenuación total corregida [dB]	162.53

Figura. 4.29. Resultados para el modelo Hata.

4.2.3 Análisis de resultados para el modelo de Ikegami.

Para trabajar con el modelo de Ikegami se presiona el botón modelo de Ikegami en el menú Propagación en Macroceldas del programa, aparece entonces el cuadro de diálogo Propagación en macroceldas modelo de Ikegami, que calcula las pérdidas de propagación usando el modelo de Ikegami estudiado en el capítulo 2. El cuadro de diálogo permite ingresar las siguientes variables de entrada: alturas H y hr en metros, parámetro W en metros, ángulo phi en grados, frecuencia en MHz, distancia en Km e Ir el cuál puede ser seteado o calculado por el programa. Para el primer ejemplo se ingresan los siguientes datos de entrada: H=30 m, hr=1.5 m, W=50 m, Phi =90°, f=850 MHz, d=3 Km. **Figura 4.30.**

Figura. 4.30. Ingreso de datos modelo de Ikegami.

Al presionar el botón Calcular se obtienen las pérdidas de propagación en dB usando el modelo de Ikegami, en este caso $L_b=135.71$ dB. **Figura 4.31.**

The screenshot shows a software window titled "Propagación en Macroceldas Modelo de Ikegami". It contains two main sections: "Parámetros de entrada" and "Resultados".

Parámetros de entrada:

- Alturas (m): H: 30, hr: 1.5
- Parámetros de planta: W (m): 50, Phi (°): 90
- Frecuencia (MHz): 900, Distancia (Km.): 3
- Ir: 3.2

Resultados:

Pérdidas básicas Lb (dB):	135.81
---------------------------	--------

Buttons at the bottom: "Información...", "Calcular", "Cerrar".

Figura 4.31. Resultados modelo de Ikegami.

Para el segundo ejemplo se ingresan los siguientes datos de entrada: H=15 m, hr=1 m, W=25 m, Phi =90°, f=1900 MHz, d=5 Km. **Figura 4.32.**

The screenshot shows the same software window as Figure 4.31, but with different input values. The "Resultados" section is currently empty.

Parámetros de entrada:

- Alturas (m): H: 15, hr: 1
- Parámetros de planta: W (m): 25, Phi (°): 90
- Frecuencia (MHz): 1900, Distancia (Km.): 5
- Ir: 3.2

Buttons at the bottom: "Información...", "Calcular", "Cerrar".

Figura 4.32. Ingreso de variable modelo de Ikegami.

Al presionar el botón Calcular se obtienen las pérdidas de propagación en dB usando el modelo de Ikegami, en este caso $L_b=135.71$ dB. **Figura 4.33.**

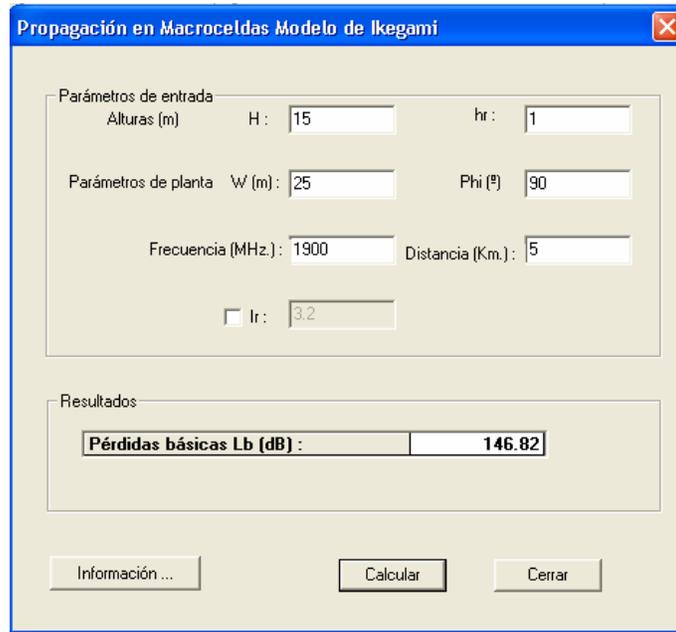


Figura. 4.33. Resultados modelo de Ikegami.

Al presionar el botón Información se obtienen la geometría del modelo de Ikegami. **Figura 4.34.**

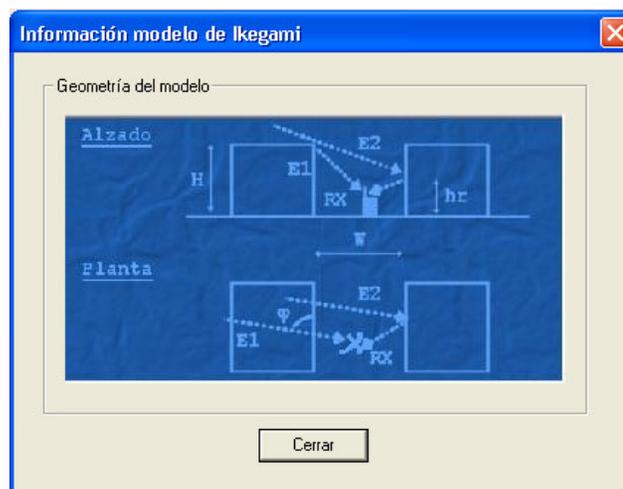


Figura. 4.34. Información modelo de Ikegami.

4.2.4 Análisis de resultados para el modelo de Walfish-Bertoni.

Para trabajar con el modelo de Walfish-Bertoni se presiona el botón modelo de Walfish-Bertoni en el menú Propagación en Macroceldas del programa, aparece entonces el cuadro de diálogo Propagación en macroceldas modelo de Walfish-Bertoni, que calcula las pérdidas de propagación usando el modelo de Walfish-Bertoni estudiado en el capítulo 2. El cuadro de diálogo permite ingresar las variables siguientes: alturas H, hr y hm en metros; parámetro b en metros, frecuencia en MHz, y distancia en Km. Para el primer ejemplo se ingresan los datos siguientes: H=10 m, hm=1.5 m, hr=20 m, b=20 m, f=850 MHz y d =2 Km. **Figura 4.35.**

Figura. 4.35. Ingreso de datos modelo Walfish-Bertoni.

Al presionar el botón Calcular se obtiene los siguientes resultados: Influencia de edificios en dB, pérdidas básicas del método Lb en dB, pérdidas en el espacio libre Lbf y pérdidas totales en dB. En este caso los resultados son los siguientes: A=2.15 dB, Lb=49.78 dB, Lbf= 97.06 dB, pérdidas totales= 146.84 dB. **Figura 4.36.**

The screenshot shows a software window titled "Propagación en macroceldas modelo Walfish - Bertoni". It contains two main sections: "Datos de entrada" (Input Data) and "Resultados" (Results).

Datos de entrada:

- Alturas (m): H: 10, hm: 1.5
- hr: 20
- Parámetros de planta: b (m): 20
- Frecuencia (MHz.): 850, d (Km.): 2

Resultados:

Influencia edificios A (dB) :	2.15
Pérdidas básicas del método Lb (dB) :	49.78
Pérdidas en el espacio libre Lbf (dB) :	97.06
Pérdidas totales (dB) :	146.84

Buttons at the bottom: "Información ...", "Calcular", and "Salir".

Figura. 4.36. Resultados modelo Walfish-Bertoni.

Para el segundo ejemplo se ingresan los datos siguientes: H=5 m, hm=1 m, hr=25 m, b=25 m, f=1900 MHz y d =5 Km. **Figura 4.37.**

The screenshot shows the same software window as Figure 4.36, but with different input values. The "Resultados" section is currently empty.

Datos de entrada:

- Alturas (m): H: 5, hm: 1
- hr: 25
- Parámetros de planta: b (m): 25
- Frecuencia (MHz.): 1900, d (Km.): 5

Buttons at the bottom: "Información ...", "Calcular", and "Salir".

Figura. 4.37. Ingreso de datos modelo Walfish-Bertoni.

Al presionar el botón Calcular se obtiene los siguientes resultados: Influencia de edificios en dB, pérdidas básicas del método Lb en dB, pérdidas en el espacio libre Lbf y pérdidas totales en dB. En este caso los resultados son los siguientes: A=2.5 dB, Lb=65.6 dB, Lbf= 112 dB, pérdidas totales= 177.6 dB. **Figura 4.38.**

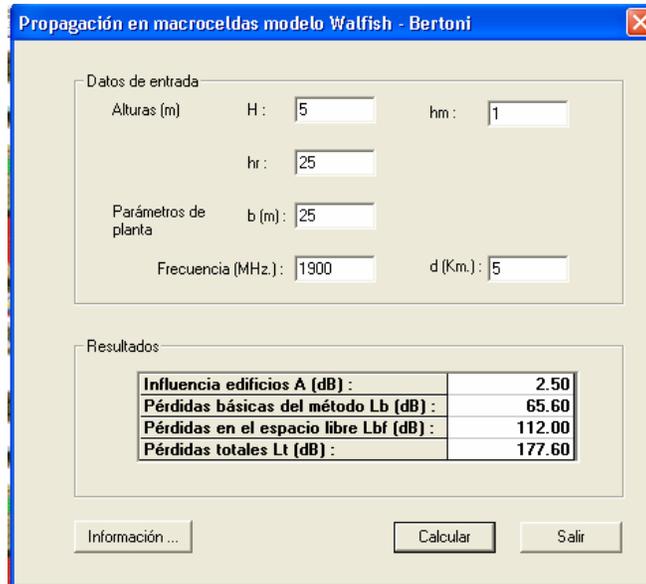


Figura. 4.38. Resultados modelo Walfish-Bertoni.

Al presionar el botón Información se obtienen la geometría del modelo de Walfish-Bertoni. **Figura 4.39.**

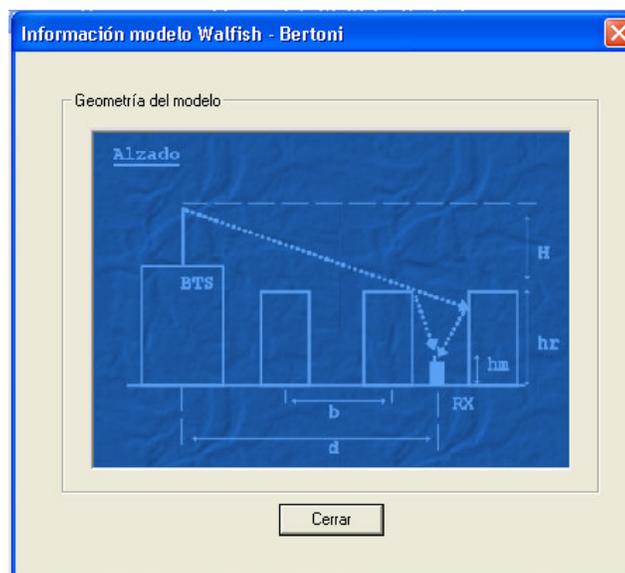


Figura. 4.39. Geometría del modelo Walfish-Bertoni.

4.2.5 Análisis de resultados para el modelo Sakagami-Kuboi.

Para trabajar con el modelo de Sakagami-Kuboi se presiona el botón modelo Sakagami-Kuboi en el menú Propagación en Macroceldas del programa, aparece entonces el cuadro de diálogo Propagación en macroceldas modelo Sakagami-Kuboi, que calcula las pérdidas de propagación usando el modelo de Sakagami-Kuboi estudiado en el capítulo 2. El cuadro de diálogo permite ingresar las variables siguientes: alturas H, $\langle H \rangle$, hb, hbo y hs en metros; parámetro W en metros, ángulo phi en grados, frecuencia en MHz y distancia en Km. Para el primer ejemplo se ingresan los datos siguientes: H=40 m, $\langle H \rangle$ =15 m, hb=50 m, hbo=60 m, hs=20 m, W=40 m, Phi=37°, f=850 MHz, d=2 Km. **Figura 4.40.**

Figura. 4.40. Ingreso de datos modelo SK.

Al presionar el botón Calcular se obtienen las pérdidas de propagación en dB. En este caso $L_b=129.89$ dB. **Figura 4.41.**

The screenshot shows a software window titled "Propagación en macroceldas Modelo Sakagami - Kuboi". It contains two main sections: "Datos de entrada" (Input Data) and "Resultados" (Results).
In the "Datos de entrada" section, the following values are entered:
- Alturas [m]: H: 40, <H>: 15, hb: 50, hbo: 60, hs: 20.
- Parámetros de planta: W[m]: 40, Phi [°]: 37.
- Frecuencia [MHz]: 850, d [Km]: 2.
In the "Resultados" section, the calculated value is displayed as "Pérdida Básica Lb (dB) : 129.89".
At the bottom, there are three buttons: "Información ...", "Calcular", and "Salir".

Figura. 4.41. Resultados modelo SK.

Para el segundo ejemplo se ingresan los datos siguientes: H=20 m, <H>=10 m, hb=25 m, hbo=30 m, hs=10 m, W=20 m, Phi=30°, f=1900 MHz, d=5 Km. **Figura 4.42.**

The screenshot shows the same software window as Figure 4.41, but with different input values:
- Alturas [m]: H: 20, <H>: 10, hb: 25, hbo: 30, hs: 10.
- Parámetros de planta: W[m]: 20, Phi [°]: 30.
- Frecuencia [MHz]: 1900, d [Km]: 5.
The "Resultados" section is currently empty, and the "Calcular" button is visible at the bottom.

Figura 4.42. Ingreso de datos modelo SK.

Al presionar el botón Calcular se obtienen las pérdidas de propagación en dB. En este caso Lb=161.81 dB. **Figura 4.43.**

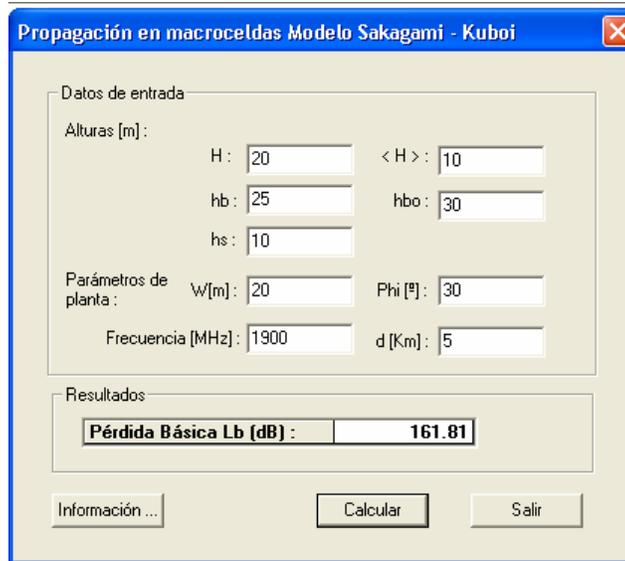


Figura. 4.43. Resultados modelo SK.

4.2.6 Análisis de resultados modelo COST 231 (Walfish-Ikegami).

Para trabajar con el modelo COST 231 se presiona el botón modelo COST 231 (Walfish-Ikegami) en el menú Propagación en Macroceldas del programa, aparece entonces el cuadro de diálogo Propagación en macroceldas modelo COST 231 (Walfish-Ikegami), que calcula las pérdidas de propagación usando el modelo COST 231 estudiado en el capítulo 2. El cuadro de diálogo tiene las variables de entrada siguientes: alturas hb, hr, hm en metros; anchuras W y b en metros; ángulo Phi en grados, frecuencia en MHz, distancia en kilómetros, y factor de corrección para ciudad pequeña o grande. Para el primer ejemplo se introducen los datos siguientes: hb=30 m, hr=20 m, hm=1.5 m, W=20 m, b=40 m, Phi=38°, f=850 MHz, d=2 Km, Ciudad pequeña. **Figura 4.44.**

Figura. 4.44. Ingreso de datos modelo COST 231.

Al presionar el botón Calcular se obtienen los siguientes resultados para el modelo: Parámetros geométricos Phi en grados, delta hb en metros, delta hr en metros, ka, kd, kf; y las atenuaciones Lbf, Lori, Lrts, Lbsh, Lmsd y Lb todas en dB. En este caso Phi= 38°, Δhb=10 m, Δhr=18.5 m, ka=54, kd=18, kd=-4.06, Lbf=97.06 dB, Lori=2.73 dB, Lrts=27.45 dB, Lbsh=-18.75 dB, Lmsd=14.37 dB, Lb=138.88 dB. **Figura 4.45.**

Parámetros intermedio		Atenuaciones	
Geométricos:		Lbf [dB]:	97.06
Phi [°]:	38.00	Lori [dB]:	2.73
delta hb [m]:	10.00	Lrts [dB]:	27.45
delta hr [m]:	18.50	Lbsh [dB]:	-18.75
Coefficientes k		Lmsd [dB]:	14.37
Lb	54.00	Lb [dB]:	138.88

Figura. 4.45. Resultados modelo COST 231.

Para el segundo ejemplo se introducen los datos siguientes: $h_b=15$ m, $h_r=10$ m, $h_m=1$ m, $W=10$ m, $b=20$ m, $\Phi=30^\circ$, $f=1900$ MHz, $d=5$ Km, Ciudad grande. **Figura 4.46.**

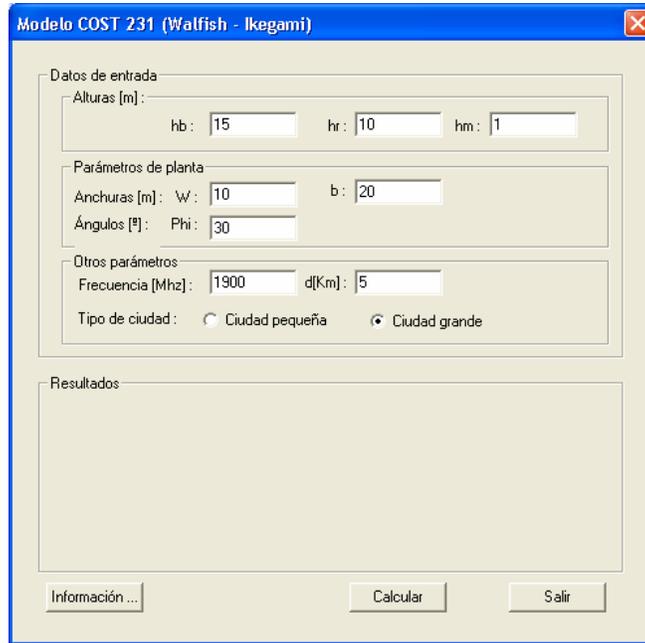


Figura. 4.46. Ingreso de datos modelo COST 231

Al presionar el botón Calcular se obtienen los siguientes resultados para el modelo: Parámetros geométricos Φ en grados, Δh_b en metros, Δh_r en metros, k_a , k_d , k_f ; y las atenuaciones L_{bf} , L_{ori} , L_{rts} , L_{bsh} , L_{msd} y L_b todas en dB. En este caso $\Phi=30^\circ$, $\Delta h_b=5$ m, $\Delta h_r=9$ m, $k_a=54$, $k_d=18$, $k_f=-2.42$, $L_{bf}=112$ dB, $L_{ori}=0.71$ dB, $L_{rts}=25.69$ dB, $L_{bsh}=-14.01$ dB, $L_{msd}=32.93$ dB, $L_b=170.62$ dB. **Figura 4.47.**

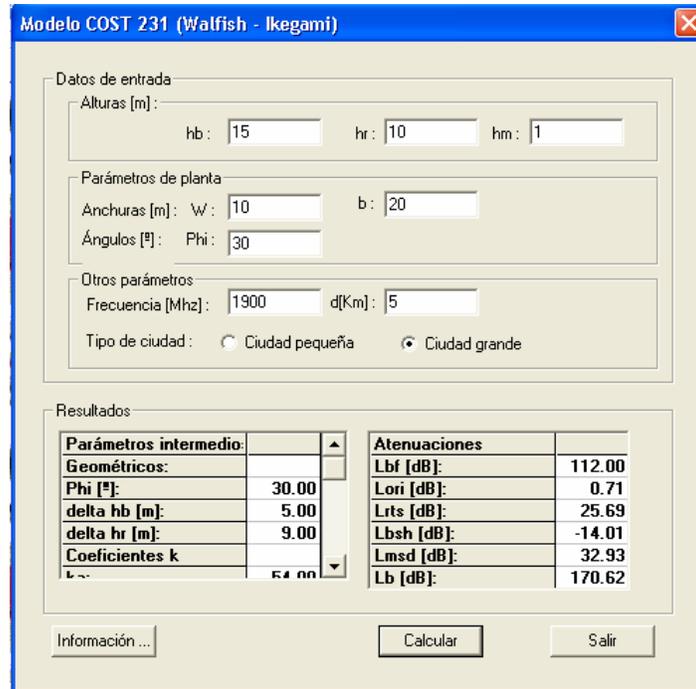


Figura. 4.47. Resultados modelo COST 231.

Al presionar el botón Información se puede observar la geometría del modelo COST-231. **Figura 4.48.**

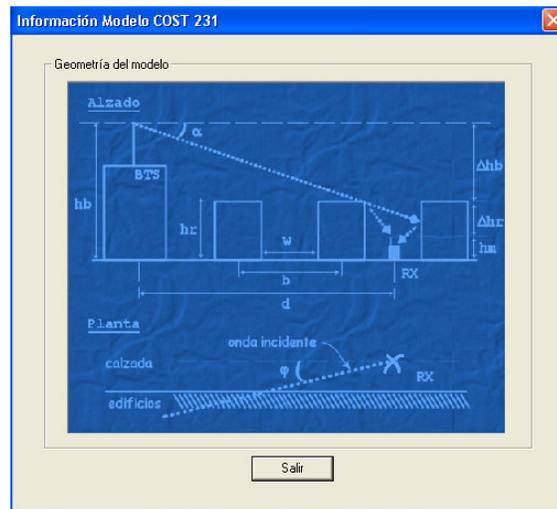


Figura. 4.48. Geometría del modelo COST 231.

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE UN CANAL MÓVIL

El simulador de un canal móvil permite realizar una simulación obtenida a partir de la teoría geométrica de la difracción GTD usando el modelo de dispersores explicado en el capítulo 2. Además permite obtener gráficamente las características principales de la señal recibida por el usuario móvil, las funciones del sistema, y características estadísticas importantes para el análisis de canales móviles.

Para trabajar con el simulador de canales móviles se selecciona el menú Simulador de un canal móvil en el programa cccorpmobile y se da click en la opción Simulador. **Figura 4.49.**

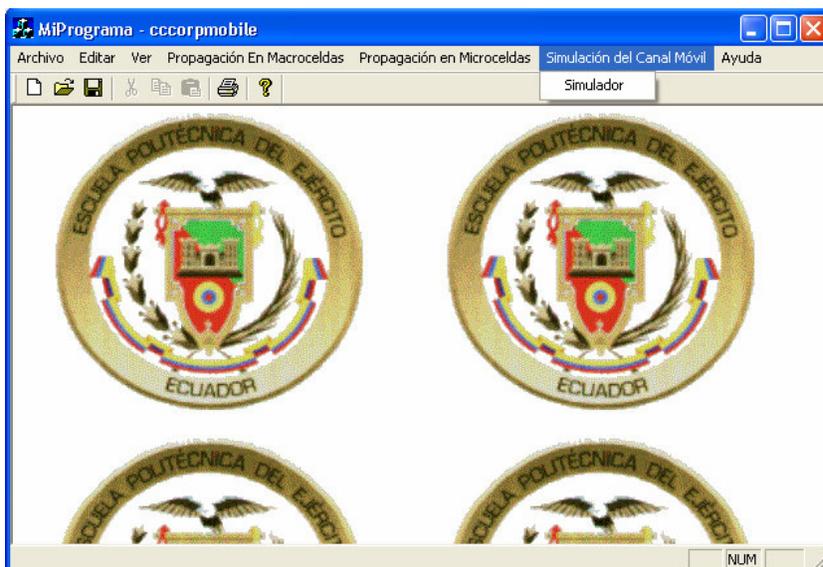


Figura. 4.49. Entrada al simulador.

Aparece el cuadro de diálogo simulador del canal móvil para el ingreso de las variables de entrada necesarias para realizar la simulación, estas son las siguientes: número de dispersores, velocidad del móvil en Km/h, frecuencia de la portadora en MHz, longitud recorrida en metros, valor medio de retardo de los rayos en us, valor medio de la potencia del primer rayo en dBW, valor medio de la diferencia de la potencia entre el primer y último rayo en dB. Además aparecen el botón Simular para empezar la simulación y los botones que presentan los gráficos para el análisis de la simulación.

Se van a realizar varios ejemplos de simulación variando los parámetros de entrada especialmente el número de dispersores y por tanto el número de rayos recibidos por el usuario móvil, queda entonces en manos del usuario variar los parámetros de entrada del simulador para obtener los resultados según sus necesidades.

Para el primer ejemplo de análisis se va a simular un canal móvil con las siguientes características: número de dispersores 99, velocidad del móvil 60 Km/h, frecuencia de portadora 850 MHz, valor medio del retardo de los rayos 1 us, valor medio de la potencia del primer rayo -30 dBW, valor medio de la diferencia de potencia entre el primer y último rayo 30 dB. La distancia recorrida siempre será de 10 metros para que el tiempo de simulación sea pequeño por lo tanto el cuadro de edición para la longitud recorrida siempre estará deshabilitado para el usuario. **Figura 4.50.**

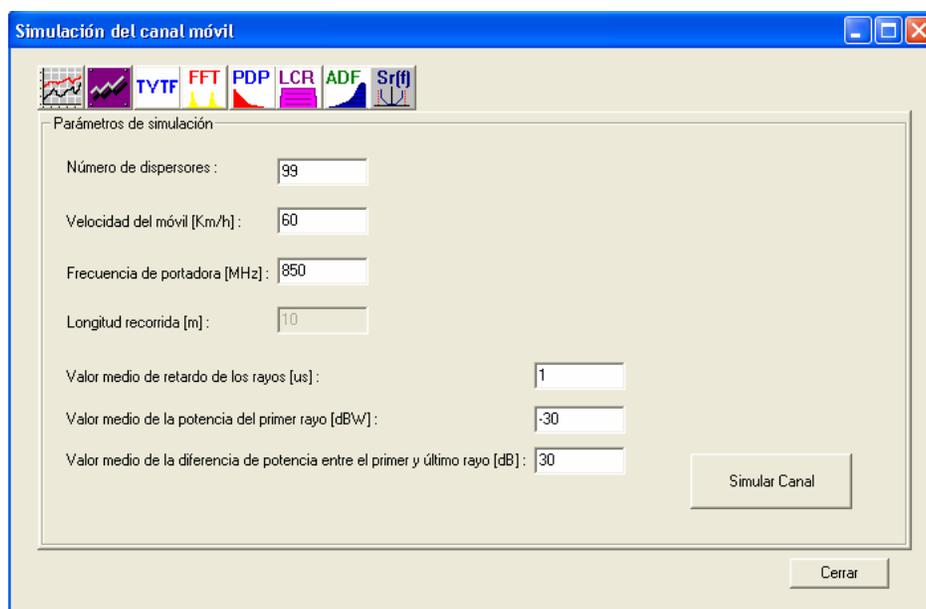


Figura 4.50. Ingreso de parámetros de entrada del simulador de un canal móvil.

Al presionar el botón Simular Canal se obtienen los resultados de la simulación del canal móvil con los parámetros ingresados. **Figura 4.51.**

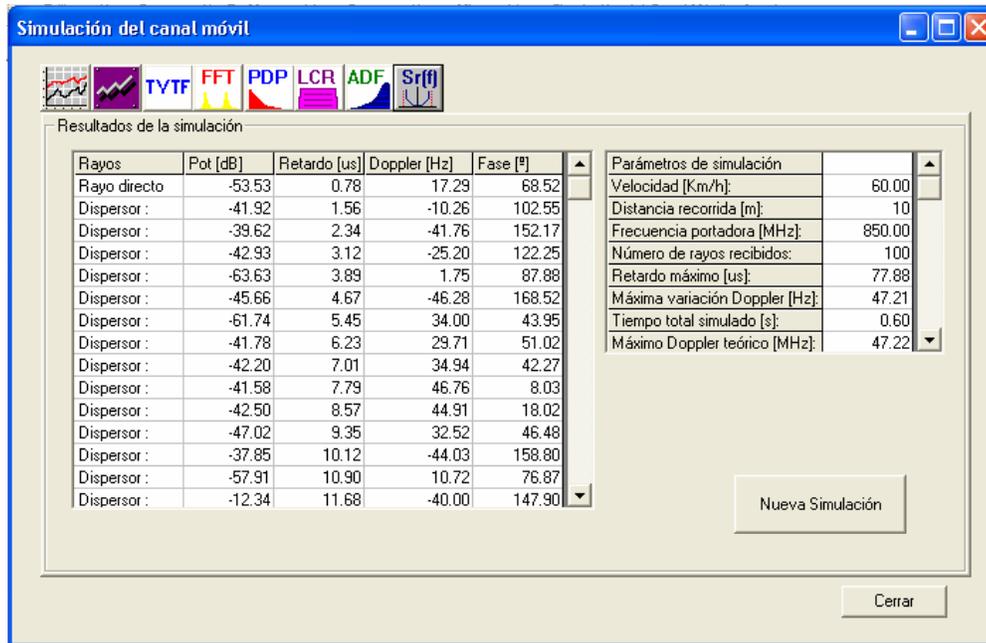


Figura. 4.51. Resultados de la simulación.

Se obtienen los resultados de la potencia en dB, el retardo en us, la frecuencia Doopler en Hz y la fase en grados tanto para el rayo directo como para los rayos que llegan de los dispersores. Estos cuatro parámetros caracterizan a las componentes de multirrayecto por lo que permiten obtener la señal recibida por el usuario móvil mediante el modelo de dispersores o sea la suma de los rayos que partiendo del transmisor llegan al receptor incidiendo en un elemento dispersor.

Se tiene también un cuadro de los parámetros de simulación y las estadísticas mas importantes como el retardo máximo o sea el rayo que llegó mas tarde al usuario móvil, la máxima variación Doopler entre los rayos, el tiempo total simulado y el máximo Doopler teórico.

Para observar la señal recibida por el receptor se presiona el primer botón de la izquierda del cuadro de diálogo que permite observar la amplitud relativa a LOS. **Figura 4.52.**

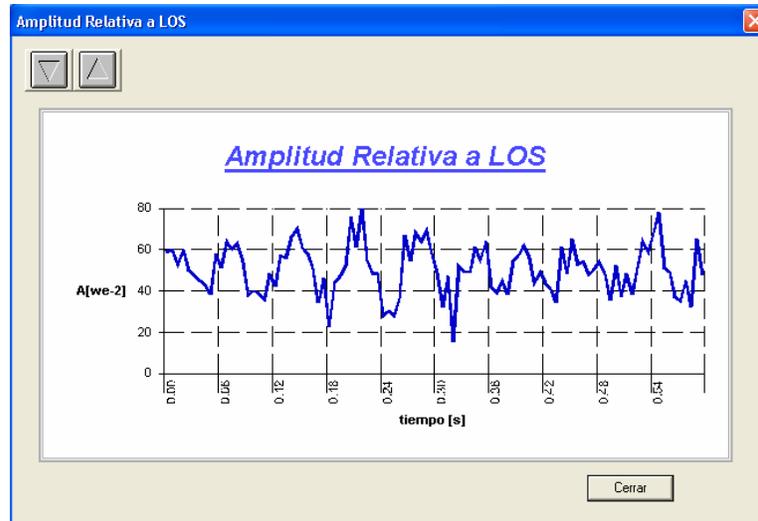


Figura. 4.52. Amplitud relativa a LOS.

Se observa en el gráfico que el valor de potencia de la señal que recibe el usuario móvil es mayor a 0.2 Watts en todo el tiempo total simulado, llegando a picos de 0.8 Watts y que tiene un valor medio de alrededor de 0.5 Watts, por lo que las pérdidas en el tiempo de simulación fueron alrededor del 50% (la potencia de transmisión es de alrededor de 1 Watt). Esto se debe a que los diferentes rayos que llegan al receptor se suman para obtener la señal resultante y pueden anularse entre sí, además, en los dispersores se pierde potencia dependiendo de las características de reflexión que estos tengan. En cuanto a la forma de onda la forma esperada en el receptor es una cosenoidal y observando en el gráfico se puede distinguir que cumple el patrón pero que este es muy irregular, esto se debe a que se suman muchas ondas coseno de cada uno de los dispersores para obtener la señal recibida.

Se puede realizar zoom in y zoom out del gráfico obtenido presionando los botones que se encuentran en la parte posterior del cuadro de diálogo.

Para observar la fase de la señal recibida por el receptor se presiona el segundo botón de la izquierda del cuadro de diálogo. **Figura 4.53.**

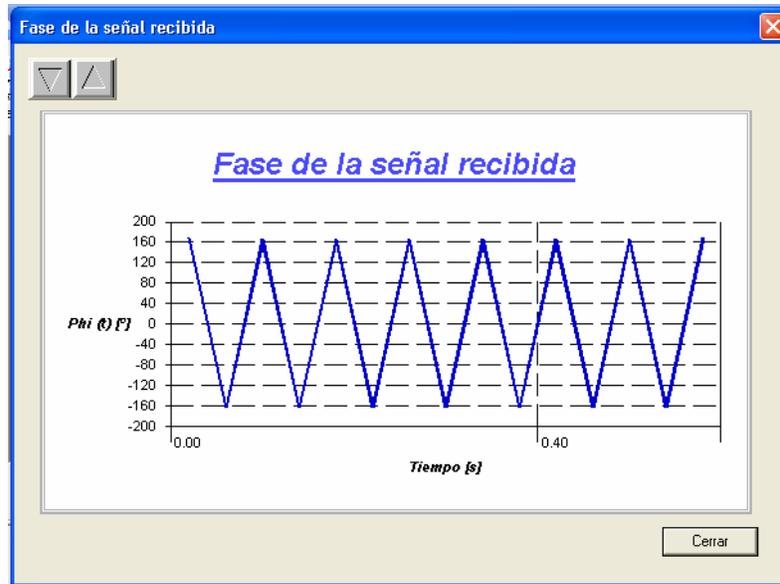


Figura. 4.53. Fase de la señal recibida.

Se observa en el gráfico que la fase de la señal que recibe el receptor varía entre los valores de 160° y -160° , y que varía dependiendo del tiempo de simulación, este valor se obtiene al sumar todos los rayos que llegan al receptor y obteniendo la fase de la señal resultante. Se puede realizar zoom in y zoom out presionando los botones de la parte superior izquierda del cuadro de diálogo.

Para observar el módulo respuesta en frecuencia del canal TVTF se presiona el botón TVTF que se encuentra en la parte superior del cuadro de diálogo. **Figura 4.54.**

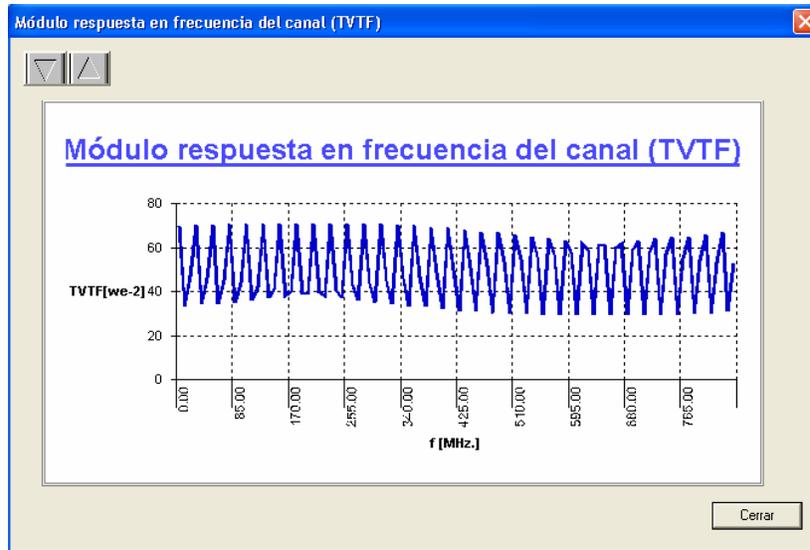


Figura. 4.54. Gráfico de TVTF.

Se puede observar en el gráfico que la función de transferencia variable con el tiempo tiene una forma que asemeja a una onda cosenoidal que varía en la frecuencia hasta llegar a la frecuencia de la portadora, esto es porque la TVTF es la suma de los múltiples rayos obtenidos empleando el modelo de dispersores ya que para la excitación cisoidal que se ha utilizado en la simulación, la respuesta es la entrada cisoidal multiplicada por la TVTF la cual tiene la forma de un coseno. Se puede concluir entonces que la TVTF es la suma de las funciones de transferencia de cada uno de los rayos que parten del transmisor y llegan al receptor.

Para obtener el módulo del espectro de la señal recibida se presiona el botón FFT ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo que presenta los resultados de la simulación del canal móvil. **Figura 4.55.**

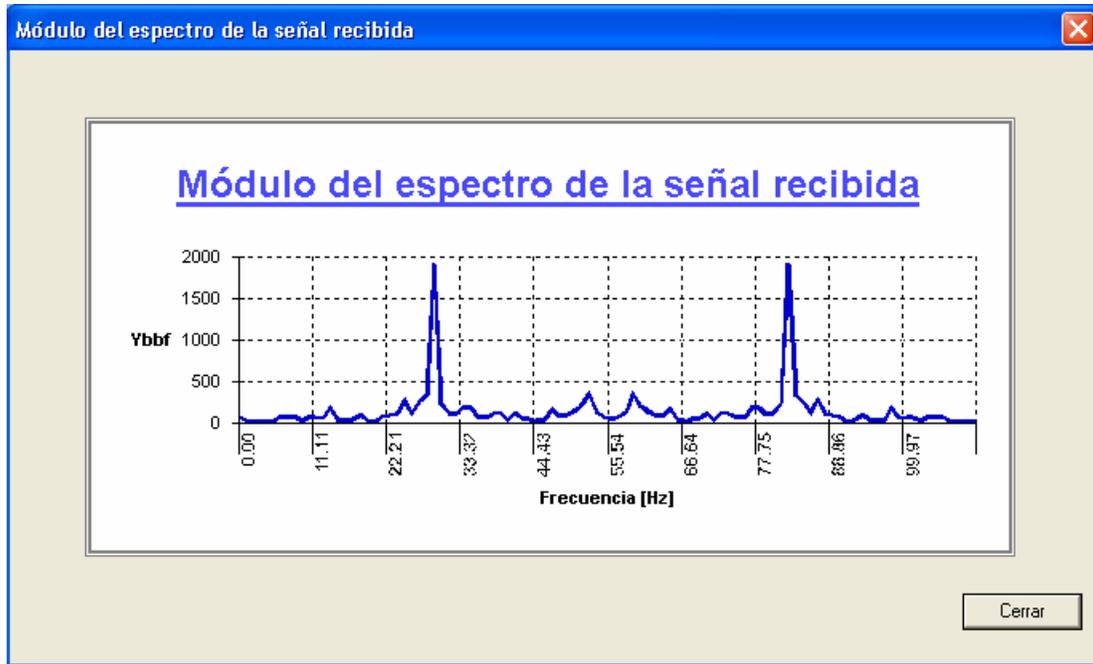


Figura. 4.55. Módulo del espectro de la señal recibida.

Se observa en el gráfico la FFT de la señal recibida por el receptor, este espectro tiene dos picos altos que representan la FFT de una señal cosenoidal o sea dos impulsos, esto es porque la respuesta del modelo de dispersores a la excitación de entrada es una señal cosenoidal con lo cual se ha comprobado que la señal recibida es parecida a un coseno. Los picos que se presentan en el módulo del espectro están presentes por que la señal recibida por el usuario móvil es una señal cosenoidal irregular.

Si presionamos encima de la señal se obtienen la FFT de cada uno de los puntos de la señal recibida. Para realizar zoom in o zoom out del gráfico se presionan los botones ubicados en la parte superior izquierda del cuadro de diálogo.

Para obtener el gráfico del perfil retardo – potencia se presiona el botón PDP ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo de resultados de la simulación de un canal móvil.

Figura 4.56.

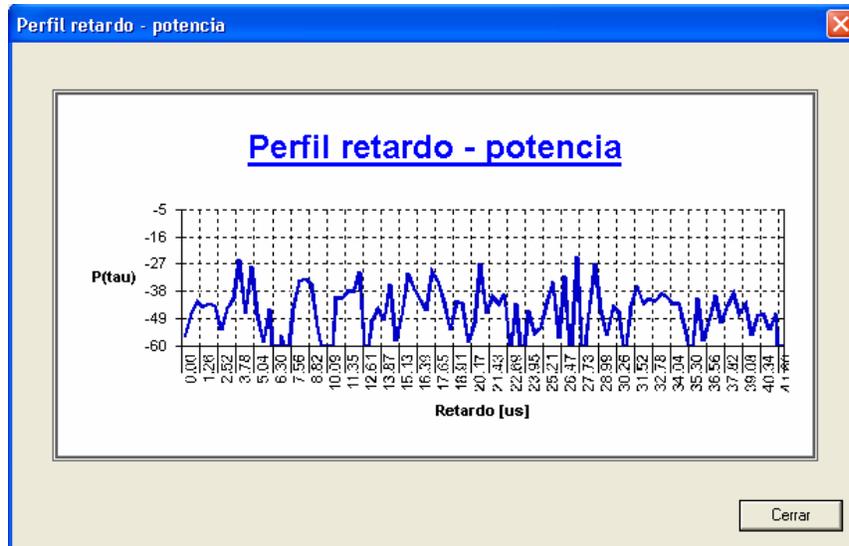


Figura. 4.56. Perfil retardo – potencia.

En el gráfico se observan los rayos que van llegando al receptor ordenados de menor a mayor retardo, se nota que el primer rayo llega casi inmediatamente y se necesitan alrededor de 42us para que llegue el último rayo al receptor, además se observa que la mayor potencia con la que llegan los rayos es de alrededor de -26 dBW y los rayos de menor potencia son los de -60 dbW. Al hacer click en la línea que dibuja los rayos podemos tener claramente ubicados los puntos que representan la potencia y el retardo de cada rayo, que representan a los dispersores y al rayo directo.

Para obtener el gráfico de level crossings rate se presiona el botón LCR ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo de resultados de la simulación del canal móvil. **Figura 4.57.**

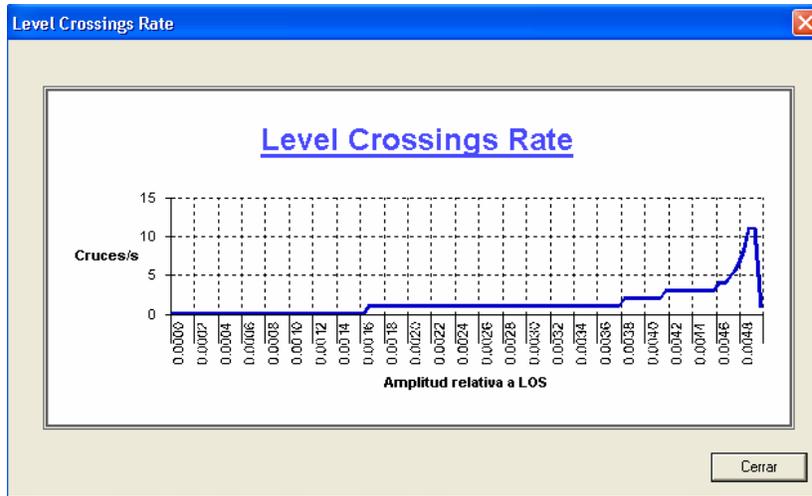


Figura. 4.57. Level crossings rate.

En el gráfico de LCR se observa que a mayor amplitud relativa a LOS, mayor es el número de veces por segundo que cada rayo cruza el nivel de tensión r en sentido ascendente de la señal recibida por el receptor, llegando a un máximo 12 cruces/s.

Para obtener el gráfico de average duration of fades se presiona el botón ADF ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo de resultados de la simulación del canal móvil.

Figura 4.58.

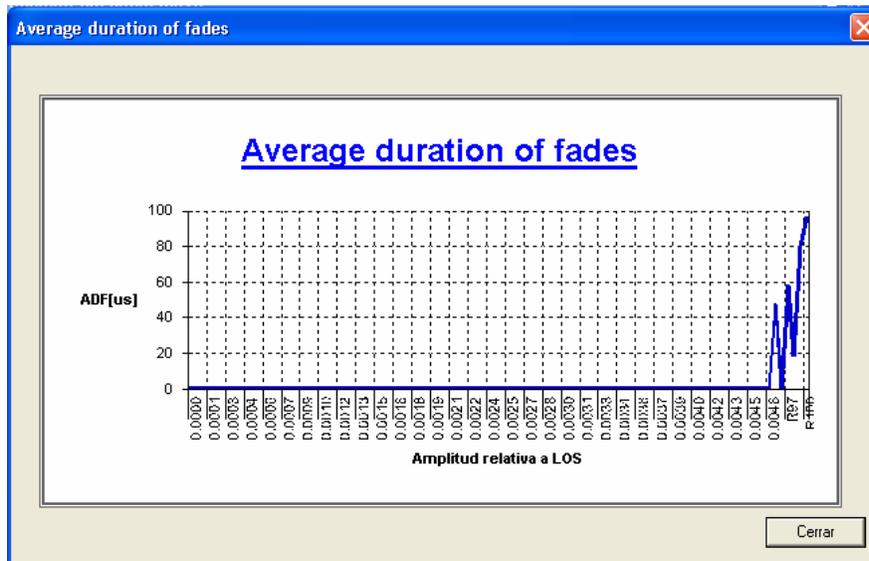


Figura. 4.58. Average duration of fades.

Se puede observar que para la mayoría de los rayos la duración media del desvanecimiento ADF es prácticamente cero por lo que la señal recibida por el receptor en estos casos está por encima del nivel normalizado de ρ lo que significa que la probabilidad de que haya una interrupción en la recepción es mínima.

Para obtener la densidad espectral de frecuencia se presiona el botón $S_r(f)$ que está ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo de la simulación de un canal móvil.

Figura 4.59.

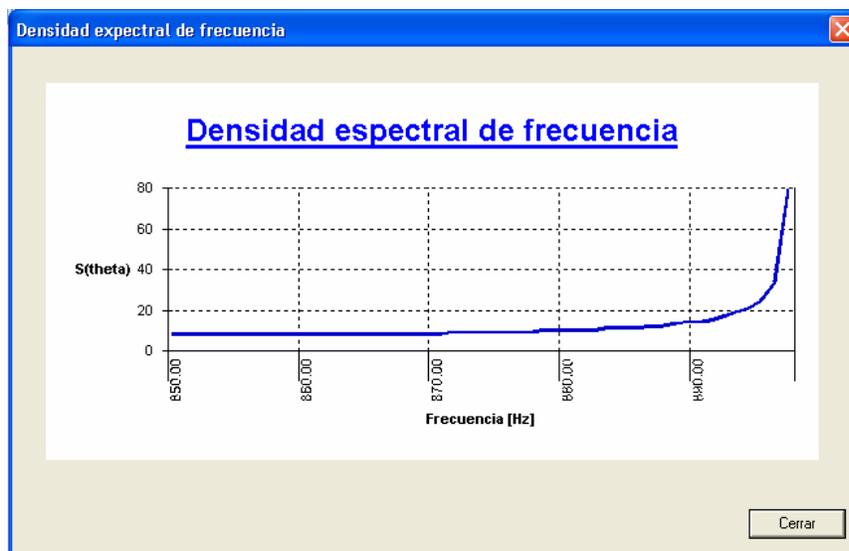


Figura. 4.59. Densidad espectral de frecuencia.

Se observa en el gráfico la densidad espectral de frecuencia que es la característica Doppler del canal y se puede utilizar para la simulación física del efecto multirayecto, o sea se puede obtener un perfil Rayleigh de desvanecimiento multirayecto mediante procesos pasabajos gaussianos a partir de generadores gaussianos a cuya salida se aplican filtros Doppler de densidad espectral $S_r(f)$.

Para el segundo ejemplo de análisis se va a simular un canal móvil con las siguientes características: número de dispersores 50, velocidad del móvil 60 Km/h, frecuencia de portadora 1900 MHz, valor medio del retardo de los rayos 1 us, valor medio de la potencia del primer rayo -30 dBW, valor medio de la diferencia de potencia entre el primer y último

rayo 30 dB. La distancia recorrida siempre será de 10 metros para que el tiempo de simulación sea pequeño por lo tanto el cuadro de edición para la longitud recorrida siempre estará deshabilitado para el usuario. **Figura 4.60.**

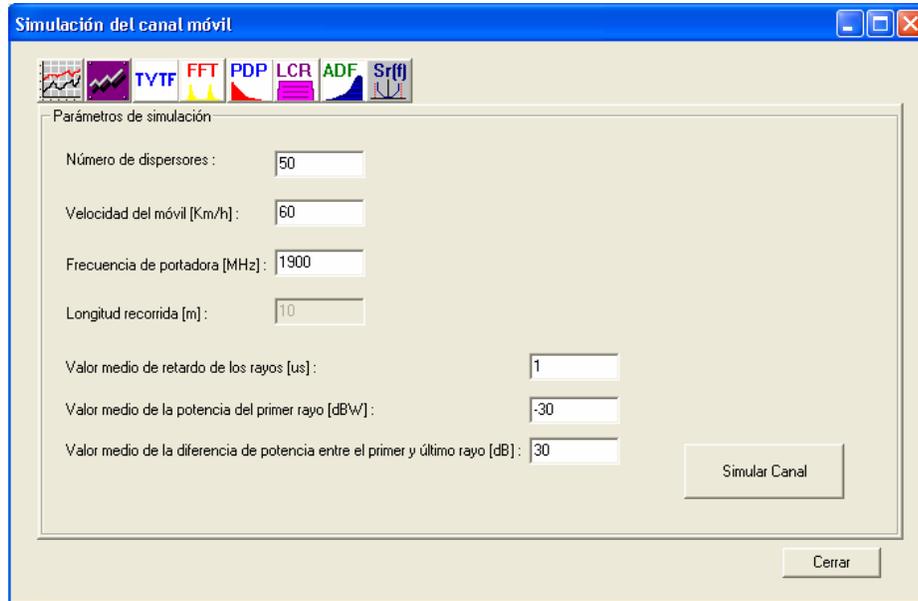


Figura. 4.60. Ingreso de datos para la Simulación del canal móvil

Al presionar el botón Simular Canal se obtienen los resultados de la simulación del canal móvil con los parámetros ingresados. **Figura 4.61.**

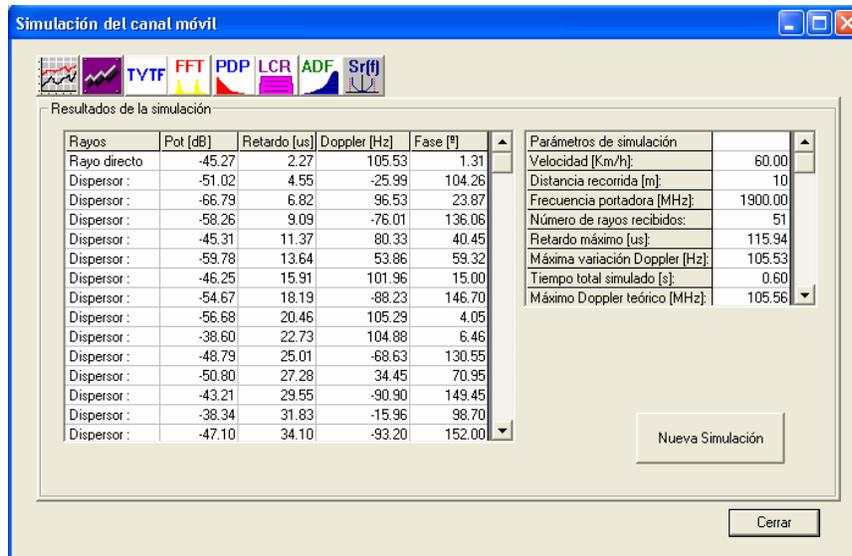


Figura. 4.61. Resultados de la simulación.

Se obtienen los resultados de la potencia en dB, el retardo en us, la frecuencia Doppler en Hz y la fase en grados tanto para el rayo directo como para los rayos que llegan de los dispersores. Estos cuatro parámetros caracterizan a las componentes de multitrayecto por lo que permiten obtener la señal recibida por el usuario móvil mediante el modelo de dispersores o sea la suma de los rayos que partiendo del transmisor llegan al receptor incidiendo en un elemento dispersor.

Se tiene también un cuadro de los parámetros de simulación y las estadísticas más importantes como el retardo máximo o sea el rayo que llegó mas tarde al usuario móvil, la máxima variación Doppler entre los rayos, el tiempo total simulado y el máximo Doppler teórico. Para observar la señal recibida por el receptor se presiona el primer botón de la izquierda del cuadro de diálogo que permite observar la amplitud relativa a LOS. **Figura 4.62.**

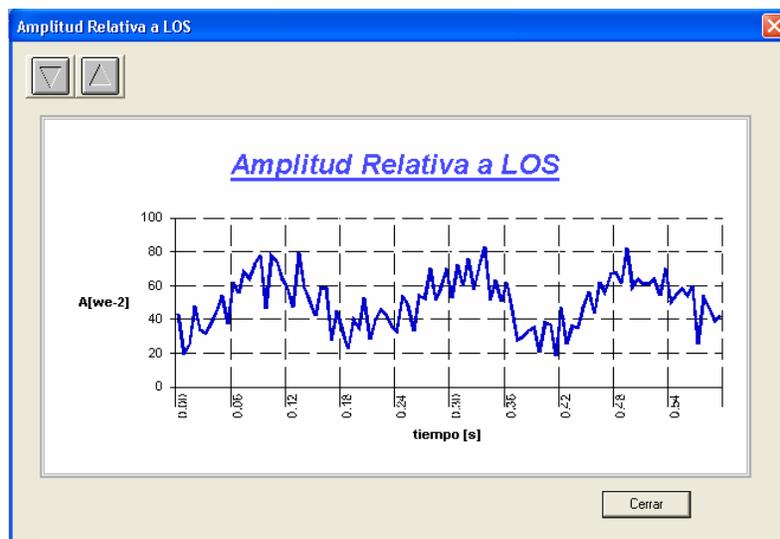


Figura. 4.62. Amplitud relativa a LOS.

Se puede observar que el receptor recibe una señal con picos de potencias máximos de 0.8 dB, los picos menores son de 0.2 dB y que la media recibida por la señal es de 0.5 dB lo que supone una pérdida del 50% de la potencia de la señal ya que la potencia de transmisión es de alrededor de 1 watt. Esto se debe a que los diferentes rayos que llegan al receptor se suman para obtener la señal resultante y pueden anularse entre sí, además, en

los dispersores se pierde potencia dependiendo de las características de reflexión que estos tengan. En cuanto a la forma de onda la forma esperada en el receptor es una cosenoidal y observando en el gráfico se puede distinguir que cumple el patrón pero que este es irregular, esto se debe a que se suman muchas ondas coseno de cada uno de los dispersores para obtener la señal recibida, se nota además que la señal es mucho menos irregular que cuando se la realizó la simulación con 99 dispersores esto se debe a que hay menor cantidad de señales que se deben sumar para obtener la señal recibida. Se puede realizar zoom in y zoom out del gráfico obtenido presionando los botones que se encuentran en la parte posterior del cuadro de diálogo.

Para observar la fase de la señal recibida por el receptor se presiona el segundo botón de la izquierda del cuadro de diálogo. **Figura 4.63.**

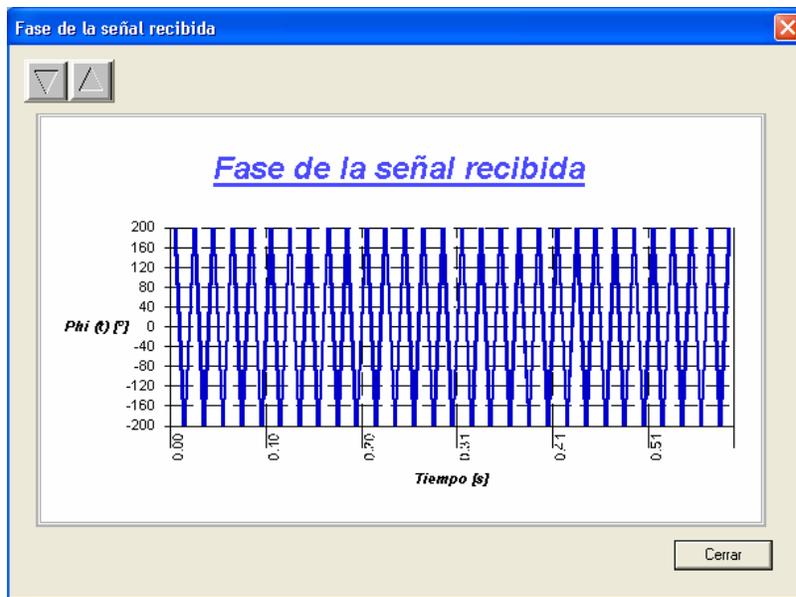


Figura. 4.63. Fase de la señal recibida.

Se observa en el gráfico que la fase de la señal que recibe el receptor varía entre los valores de 200° y -200° , y que varía dependiendo del tiempo de simulación, este valor se obtiene al sumar todos los rayos que llegan al receptor y obteniendo la fase de la señal resultante. Se puede realizar zoom in y zoom out presionando los botones de la parte superior izquierda del cuadro de diálogo.

Para observar el módulo respuesta en frecuencia del canal TVTF se presiona el botón TVTF que se encuentra en la parte superior del cuadro de diálogo. **Figura 4.64.**

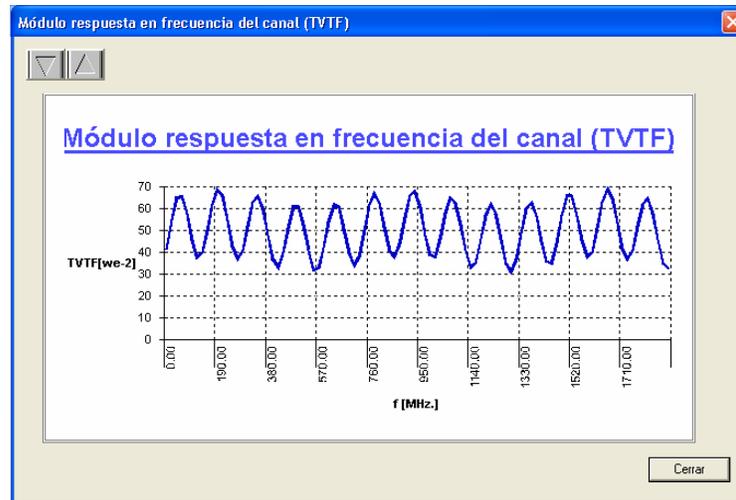


Figura. 4.64. Gráfico de TVTF.

Se puede observar en el gráfico que la función de transferencia variable con el tiempo tiene una forma que asemeja a una onda cosenoidal que varía en la frecuencia hasta llegar a la frecuencia de la portadora, esto es porque la TVTF es la suma de los múltiples rayos obtenidos empleando el modelo de dispersores, ya que para la excitación cisoidal que se ha utilizado en la simulación, la respuesta es la entrada cisoidal multiplicada por la TVTF, la cual tiene la forma de un coseno. Se puede concluir entonces que la TVTF es la suma de las funciones de transferencia de cada uno de los rayos que parten del transmisor y llegan al receptor.

Para obtener el módulo del espectro de la señal recibida se presiona el botón FFT ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo que presenta los resultados de la simulación del canal móvil. **Figura 4.65.**

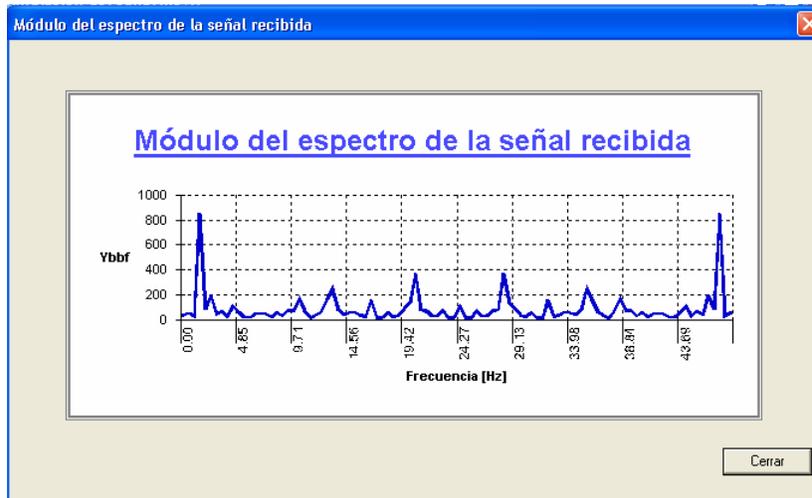


Figura. 4.65. FFT de la señal recibida.

Se observa en el gráfico la FFT de la señal recibida por el receptor, este espectro tiene dos picos altos que representan la FFT de una señal cosenoidal o sea dos impulsos, esto es porque la respuesta del modelo de dispersores a la excitación de entrada es una señal cosenoidal con lo cual se ha comprobado que la señal recibida es parecida a un coseno. Los picos que se presentan en el módulo del espectro están presentes por que la señal recibida por el usuario móvil es una señal cosenoidal irregular pero son menores que cuando había 99 dispersores por que se suman menor cantidad de rayos a la señal final.

Si presionamos encima de la señal se obtienen la FFT de cada uno de los puntos de la señal recibida. Para realizar zoom in o zoom out del gráfico se presionan los botones ubicados en la parte superior izquierda del cuadro de diálogo.

Para obtener el gráfico del perfil retardo – potencia se presiona el botón PDP ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo de resultados de la simulación de un canal móvil.

Figura 4.66.

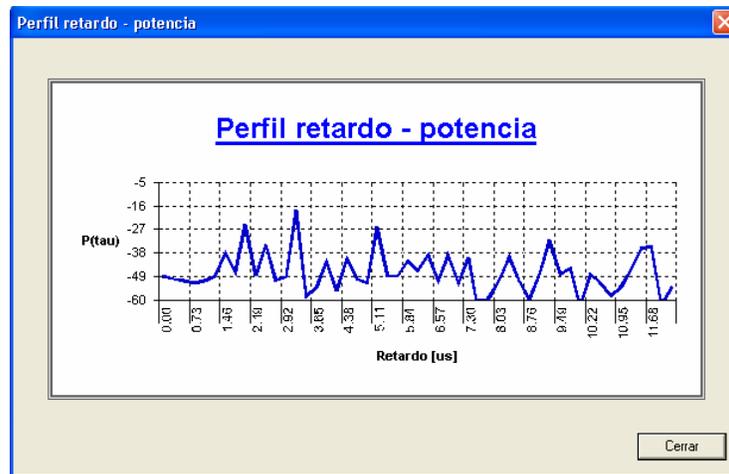


Figura. 4.66. Perfil retardo-potencia.

En el gráfico se observan los rayos que van llegando al receptor ordenados de menor a mayor retardo, se nota que el primer rayo llega casi inmediatamente y se necesitan alrededor de 12us para que llegue el último rayo al receptor, además se observa que la mayor potencia con la que llegan los rayos es de alrededor de -16 dBW y los rayos de menor potencia son los de -60 dbW. Al hacer click en la línea que dibuja los rayos podemos tener claramente ubicados los puntos que representan la potencia y el retardo de cada rayo, que representan a los dispersores y al rayo directo.

Para obtener el gráfico de level crossings rate se presiona el botón LCR ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo de resultados de la simulación del canal móvil. **Figura 4.67.**

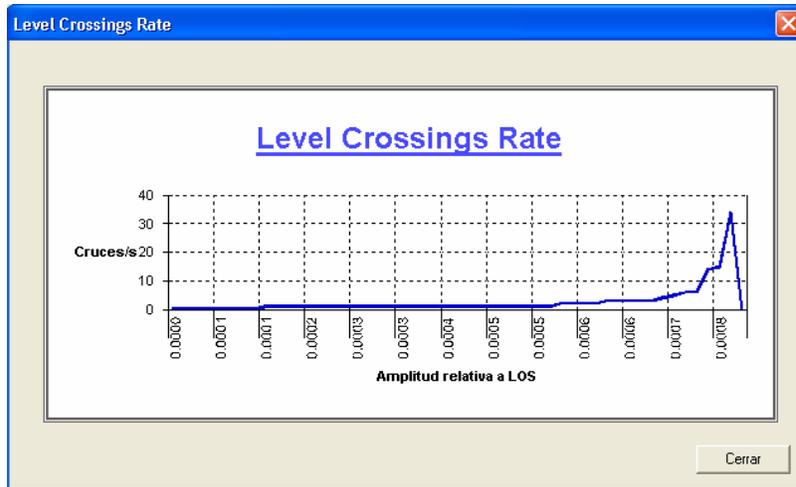


Figura. 4.67. Gráfico de LCR.

En el gráfico de LCR se observa que a mayor amplitud relativa a LOS, mayor es el número de veces por segundo que cada rayo cruza el nivel de tensión r en sentido ascendente de la señal recibida por el receptor, llegando a un máximo 34 cruces/s.

Para obtener el gráfico de average duration of fades se presiona el botón ADF ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo de resultados de la simulación del canal móvil. **Figura 4.68.**

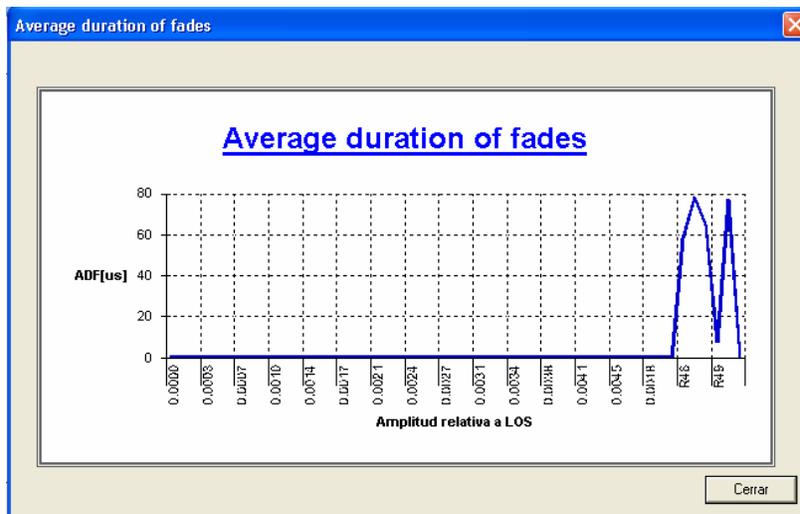


Figura. 4.68. Gráfico de ADF.

Se puede observar que para la mayoría de los rayos la duración media del desvanecimiento ADF es prácticamente cero por lo que la señal recibida por el receptor en estos casos está por encima del nivel normalizado de ρ lo que significa que la probabilidad de que haya una interrupción en la recepción es mínima.

Para obtener la densidad espectral de frecuencia se presiona el botón $S_r(f)$ que está ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo de la simulación de un canal móvil.

Figura 4.69.

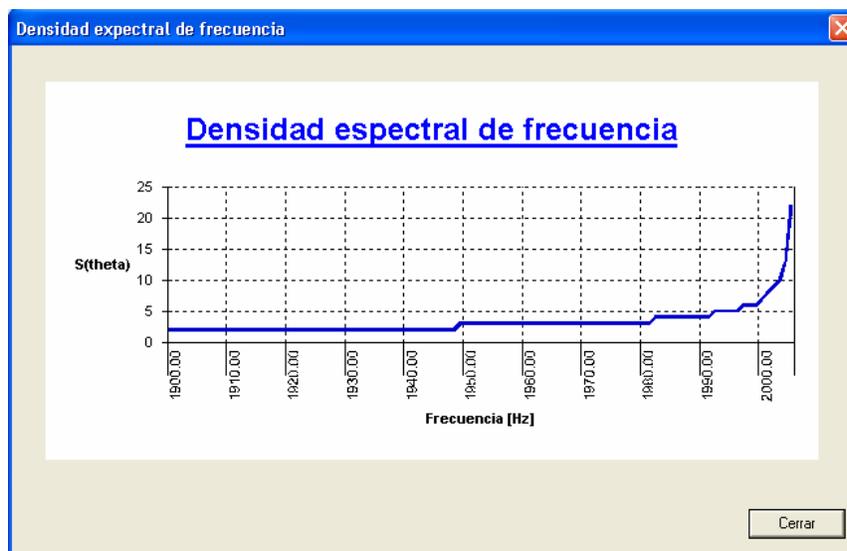


Figura. 4.69. Gráfico de la Densidad espectral de frecuencia.

Se observa en el gráfico la densidad espectral de frecuencia que es la característica Doppler del canal y se puede utilizar para la simulación física del efecto multirayecto, o sea se puede obtener un perfil Rayleigh de desvanecimiento multirayecto mediante procesos pasabajos gaussianos a partir de generadores gaussianos a cuya salida se aplican filtros Doppler de densidad espectral $S_r(f)$.

Para el tercer ejemplo de análisis se va a simular un canal móvil con las siguientes características: número de dispersores 10, velocidad del móvil 60 Km/h, frecuencia de portadora 1900 MHz, valor medio del retardo de los rayos 1 us, valor medio de la potencia

del primer rayo -30 dBW, valor medio de la diferencia de potencia entre el primer y último rayo 30 dB. La distancia recorrida siempre será de 10 metros para que el tiempo de simulación sea pequeño por lo tanto el cuadro de edición para la longitud recorrida siempre estará deshabilitado para el usuario. **Figura 4.70.**

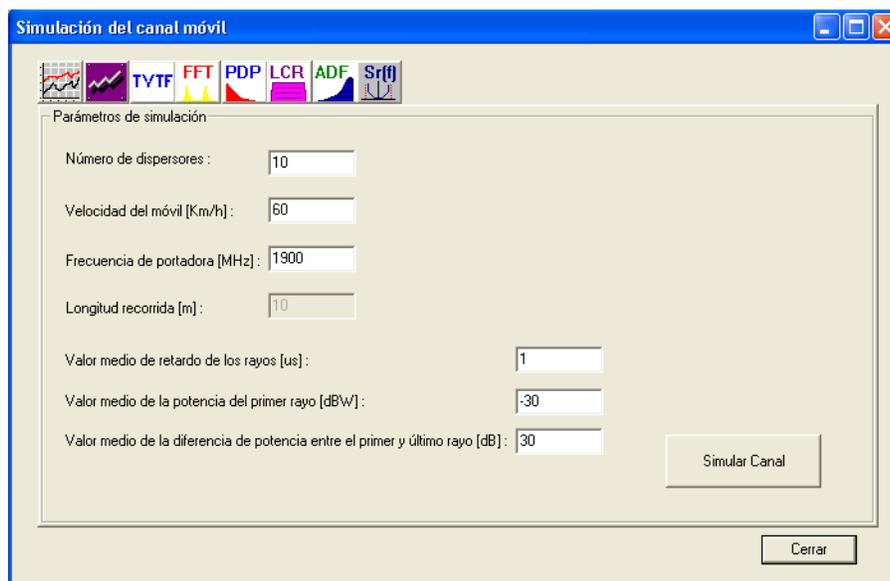


Figura. 4.70. Ingreso de datos simulación canal móvil.

Al presionar el botón Simular Canal se obtienen los resultados de la simulación del canal móvil con los parámetros ingresados. **Figura 4.71.**

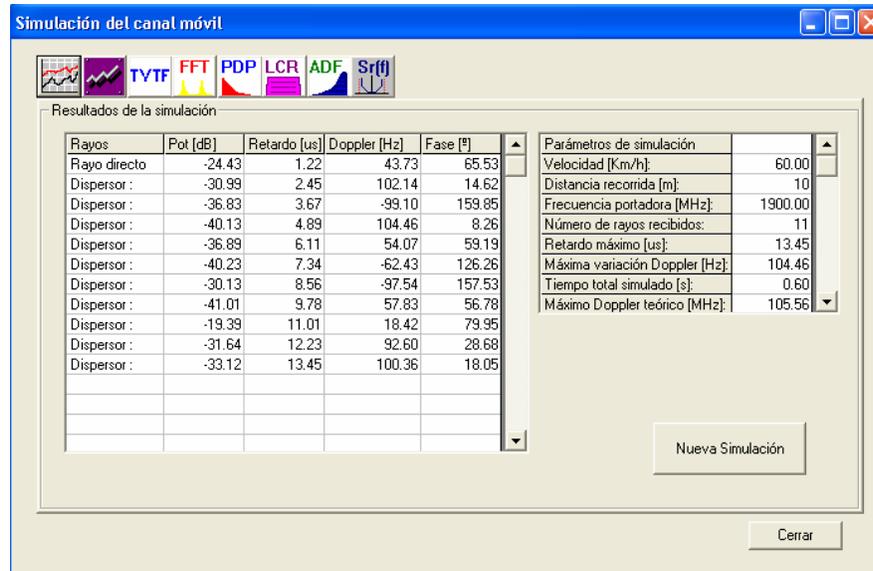


Figura. 4.71. Resultados de la simulación.

Se obtienen los resultados de la potencia en dB, el retardo en us, la frecuencia Doppler en Hz y la fase en grados tanto para el rayo directo como para los rayos que llegan de los dispersores. Estos cuatro parámetros caracterizan a las componentes de multirrayecto por lo que permiten obtener la señal recibida por el usuario móvil mediante el modelo de dispersores o sea la suma de los rayos que partiendo del transmisor llegan al receptor incidiendo en un elemento dispersor.

Se tiene también un cuadro de los parámetros de simulación y las estadísticas más importantes como el retardo máximo o sea el rayo que llegó mas tarde al usuario móvil, la máxima variación Doppler entre los rayos, el tiempo total simulado y el máximo Doppler teórico. Para observar la señal recibida por el receptor se presiona el primer botón de la izquierda del cuadro de diálogo que permite observar la amplitud relativa a LOS. **Figura 4.72.**

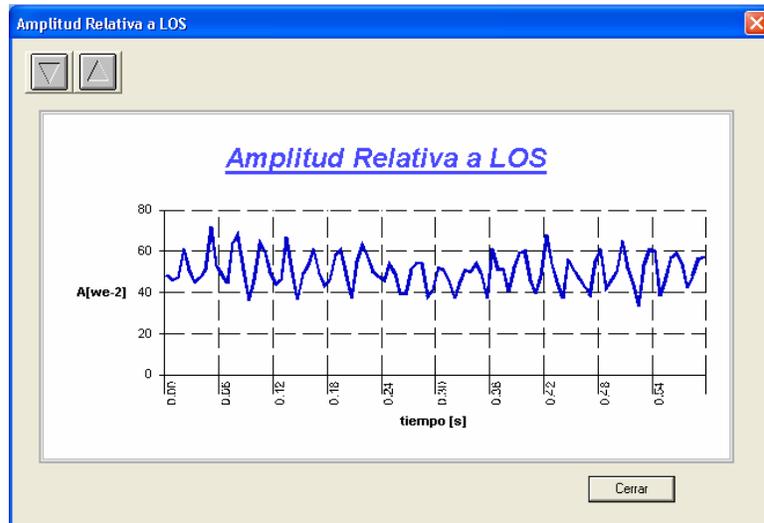


Figura. 4.72. Amplitud relativa a LOS.

Se puede observar que el receptor recibe una señal con picos de potencias máximos de 0.7 dB, los picos menores son de 0.4 dB y que la media recibida por la señal es de 0.55 dB lo que supone una pérdida del 45% de la potencia de la señal ya que la potencia de transmisión es de alrededor de 1 watt. Esto se debe a que los diferentes rayos que llegan al receptor se suman para obtener la señal resultante y pueden anularse entre sí, además, en los dispersores se pierde potencia dependiendo de las características de reflexión que estos tengan. En cuanto a la forma de onda la forma esperada en el receptor es una cosenoidal y observando en el gráfico se puede distinguir que cumple el patrón pero que este es irregular, esto se debe a que se suman muchas ondas coseno de cada uno de los dispersores para obtener la señal recibida, se nota además que la señal es mucho menos irregular que cuando se la realizó la simulación con 99 y 50 dispersores esto se debe a que hay menor cantidad de señales que se deben sumar para obtener la señal recibida. Se puede realizar zoom in y zoom out del gráfico obtenido presionando los botones que se encuentran en la parte posterior del cuadro de diálogo.

Para observar la fase de la señal recibida por el receptor se presiona el segundo botón de la izquierda del cuadro de diálogo. **Figura 4.73.**

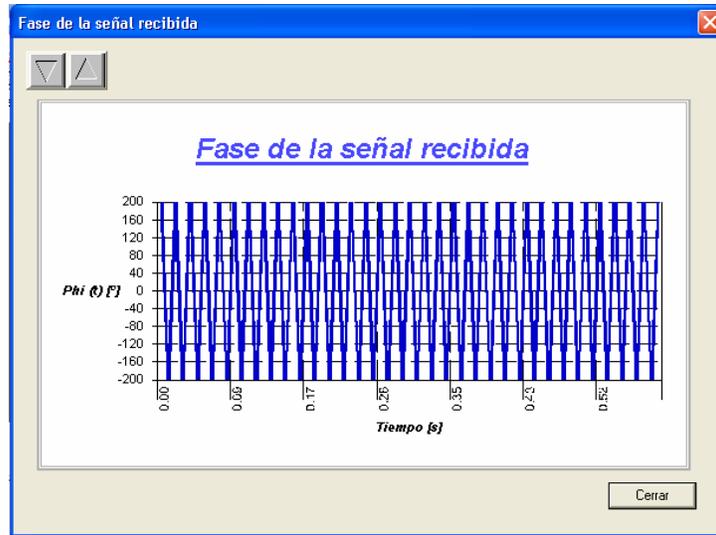


Figura 4.73. Fase de la señal recibida.

Se observa en el gráfico que la fase de la señal que recibe el receptor varía entre los valores de 200° y -200° , y que varía dependiendo del tiempo de simulación, este valor se obtiene al sumar todos los rayos que llegan al receptor y obteniendo la fase de la señal resultante. Se puede realizar zoom in y zoom out presionando los botones de la parte superior izquierda del cuadro de diálogo.

Para observar el módulo respuesta en frecuencia del canal TVTF se presiona el botón TVTF que se encuentra en la parte superior del cuadro de diálogo. **Figura 4.74.**

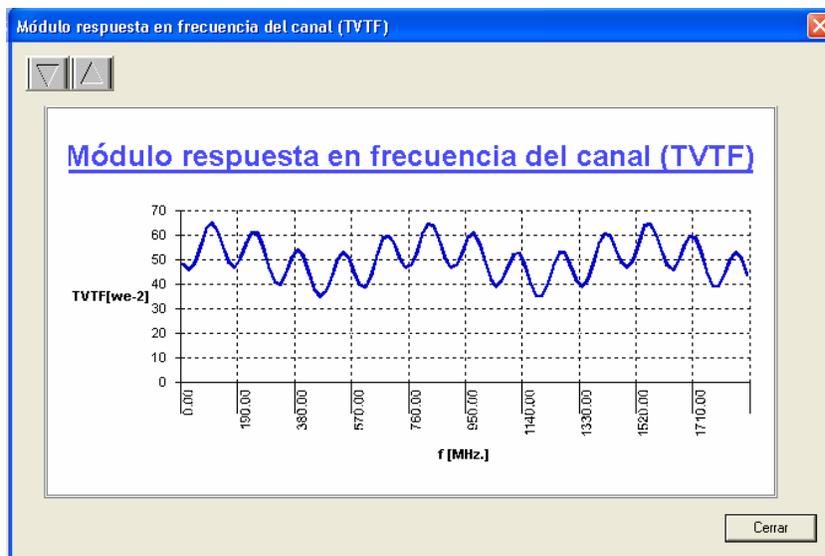


Figura. 4.74. Gráfico de TVTF

Se puede observar en el gráfico que la función de transferencia variable con el tiempo tiene una forma que asemeja a una onda cosenoidal que varía en la frecuencia hasta llegar a la frecuencia de la portadora, esto es porque la TVTF es la suma de los múltiples rayos obtenidos empleando el modelo de dispersores, ya que para la excitación cosoidal que se ha utilizado en la simulación, la respuesta es la entrada cosoidal multiplicada por la TVTF, la cual tiene la forma de un coseno. Se puede concluir entonces que la TVTF es la suma de las funciones de transferencia de cada uno de los rayos que parten del transmisor y llegan al receptor.

Para obtener el módulo del espectro de la señal recibida se presiona el botón FFT ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo que presenta los resultados de la simulación del canal móvil. **Figura 4.75.**



Figura. 4.75. FFT de la señal recibida.

Se observa en el gráfico la FFT de la señal recibida por el receptor, este espectro tiene dos picos altos que representan la FFT de una señal cosenoidal o sea dos impulsos, esto es porque la respuesta del modelo de dispersores a la excitación de entrada es una señal cosenoidal con lo cual se ha comprobado que la señal recibida es parecida a un coseno. Los picos que se presentan en el módulo del espectro están presentes por que la señal recibida

por el usuario móvil es una señal cosenoidal irregular pero son menores que cuando había 99 y 50 dispersores por que se suman menor cantidad de rayos a la señal final.

Si presionamos encima de la señal se obtienen la FFT de cada uno de los puntos de la señal recibida. Para realizar zoom in o zoom out del gráfico se presionan los botones ubicados en la parte superior izquierda del cuadro de diálogo.

Para obtener el gráfico del perfil retardo–potencia se presiona el botón PDP ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo de resultados de la simulación de un canal móvil.

Figura 4.76.

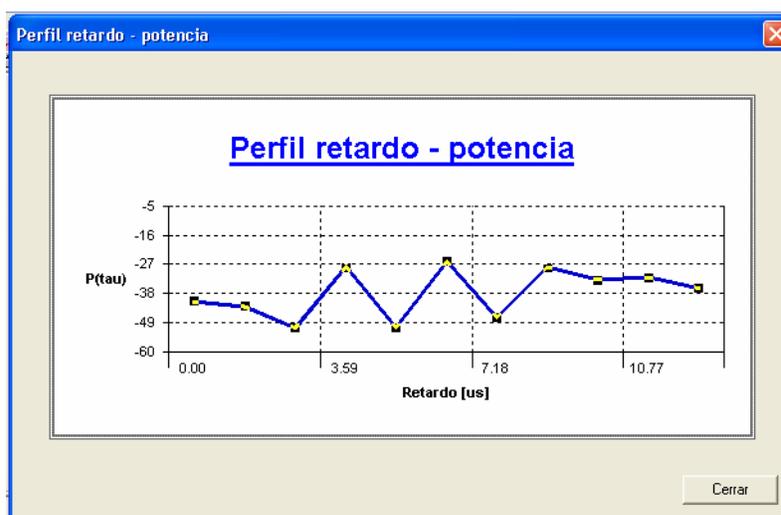


Figura. 4.76. Gráfico del perfil retardo-potencia.

En el gráfico se observan los rayos que van llegando al receptor ordenados de menor a mayor retardo, se nota que el primer rayo llega casi inmediatamente y se necesitan alrededor de 11us para que llegue el último rayo al receptor, además se observa que la mayor potencia con la que llegan los rayos es de alrededor de -27 dBW y los rayos de menor potencia son los de -50 dbW. Al hacer click en la línea que dibuja los rayos podemos tener claramente ubicados los puntos que representan la potencia y el retardo de cada rayo, que representan a los dispersores y al rayo directo.

Para obtener el gráfico de level crossings rate se presiona el botón LCR ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo de resultados de la simulación del canal móvil. **Figura 4.77.**

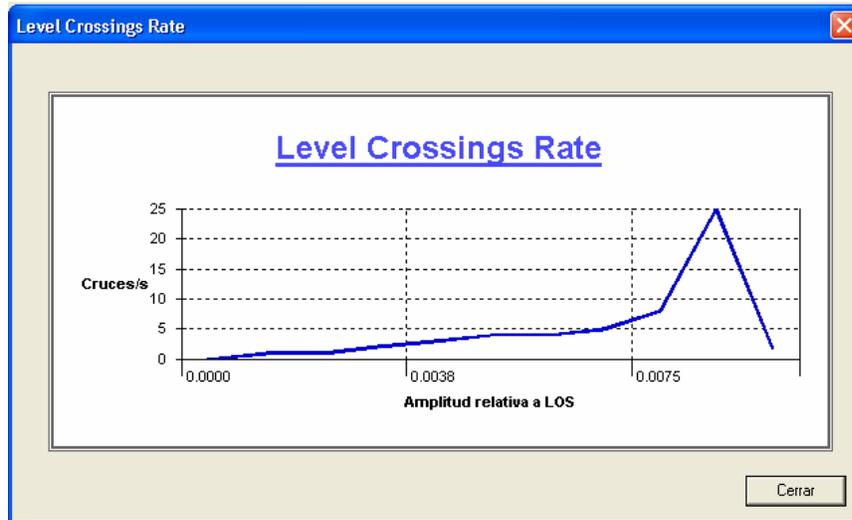


Figura. 4.77. Gráfico de LCR.

En el gráfico de LCR se observa que a mayor amplitud relativa a LOS, mayor es el número de veces por segundo que cada rayo cruza el nivel de tensión r en sentido ascendente de la señal recibida por el receptor, llegando a un máximo 25 cruces/s.

Para obtener el gráfico de average duration of fades se presiona el botón ADF ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo de resultados de la simulación del canal móvil. **Figura 4.78.**

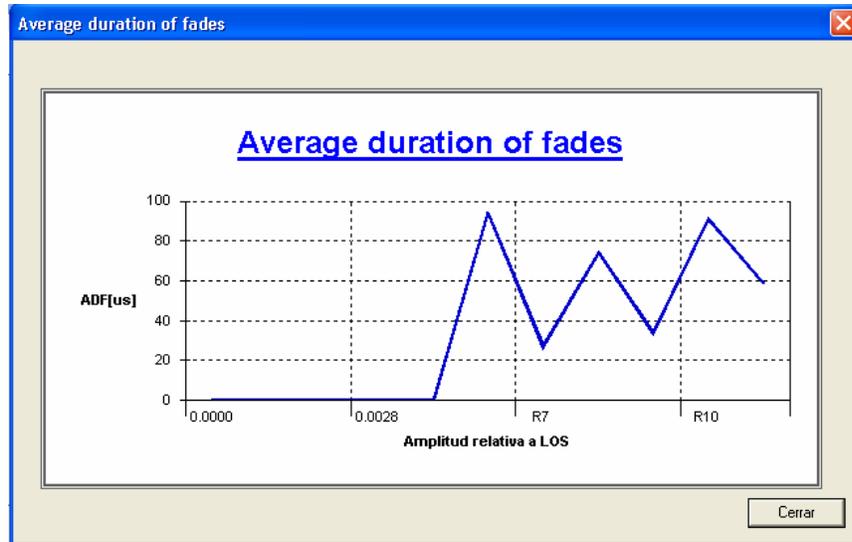


Figura. 4.78. Gráfico de ADF.

Se puede observar que para la mayoría de los rayos la duración media del desvanecimiento ADF es prácticamente cero por lo que la señal recibida por el receptor en estos casos está por encima del nivel normalizado de ρ lo que significa que la probabilidad de que haya una interrupción en la recepción es mínima, para amplitudes mayores podría existir probabilidad de interrupción en la recepción.

Para obtener la densidad espectral de frecuencia se presiona el botón $Sr(f)$ que está ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo de la simulación de un canal móvil.

Figura 4.79.

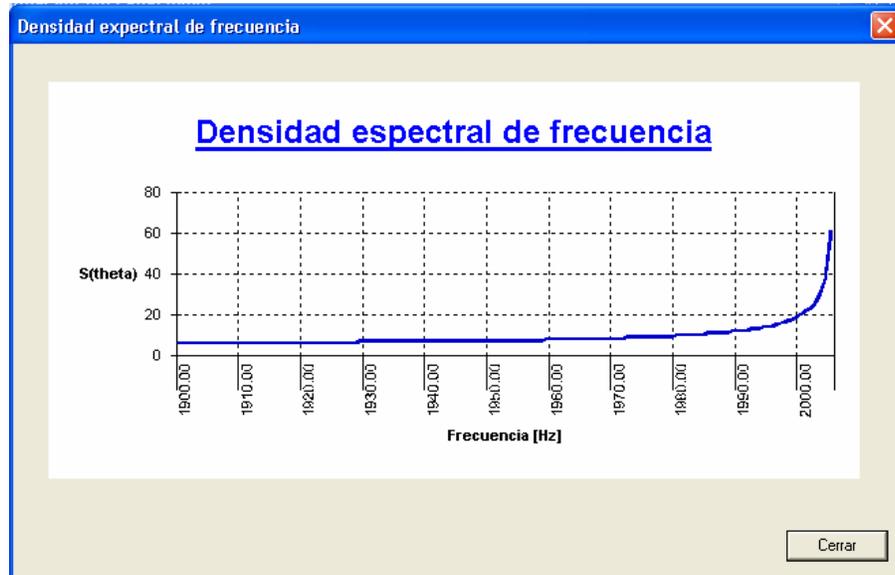


Figura. 4.79. Densidad espectral de frecuencia.

Se observa en el gráfico la densidad espectral de frecuencia que es la característica Doppler del canal y se puede utilizar para la simulación física del efecto multirayecto, o sea se puede obtener un perfil Rayleigh de desvanecimiento multirayecto mediante procesos pasabajos gaussianos a partir de generadores gaussianos a cuya salida se aplican filtros Doppler de densidad espectral $S_r(f)$.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un software capaz de calcular las pérdidas de propagación en canales móviles, con los modelos de predicción más importantes tanto para microceldas como para macroceldas, así como para un amplio rango de frecuencias especialmente para las bandas de 850 MHz. y 1900 MHz.
- Se ha programado un simulador para un canal móvil mediante el cual se pueden obtener resultados matemáticos y estadísticos importantes para caracterizar el comportamiento de canales móviles.
- El uso de herramientas matemáticas como Matlab y de lenguajes visuales como Visual C++ y Visual Basic es importante para el cálculo, análisis y desarrollo de un software, así como para generar ambientes amigables para el usuario del programa.
- La integración de herramientas de programación como Matlab, Visual C++ y Visual Basic para ser aplicados en los diferentes modelos en el área de comunicaciones móviles determinan un alto grado de conocimiento tanto en la teoría del canal móvil como en la programación para llevar a cabo una solución que resulte amigable y comprensible para el usuario.
- El desempeño correcto de un modelo de propagación depende de las características de donde sea aplicado por lo que se deben analizar estas características e implementar el modelo de predicción que mas se ajuste a las necesidades del diseño.

- Los cuatro parámetros que caracterizan a las componentes multirayecto en un canal móvil amplitud, frecuencia Doppler, retardo y desfaseamiento son aleatorios por lo tanto el proceso de simulación de un canal móvil es estocástico. Es por esto que los resultados de la simulación varían aún cuando se mantengan los valores de las variables de entrada.
- Con el simulador de canales móviles se puede predecir la potencia, la fase y el espectro de la señal que recibe un terminal móvil, mediante estos parámetros se puede analizar la calidad de recepción de señal que tiene un usuario que se mueve a una velocidad determinada.
- Para obtener la señal recibida por el receptor móvil se suman mediante el modelo de dispersores todos los rayos reflejados y el rayo directo de la señal que es transmitida por la base, los cuales deben llegar con un retardo mínimo uno del otro.
- Mediante el gráfico de Average Duration of Fades se puede obtener la probabilidad de que haya una interrupción en la recepción de una señal. Esto es importante para analizar la calidad del servicio que se ofrece al usuario.
- En la simulación del canal móvil es interesante comparar los resultados manteniendo los mismos parámetros de entrada esto permite estudiar las características estocásticas del canal.
- Es necesario estudiar los gráficos de las funciones del sistema y estadísticos para obtener un conocimiento más amplio de la simulación de un canal móvil ya que gracias a estos se pueden obtener resultados muy importantes a la hora de simular físicamente un canal o de verificar la calidad del servicio que se va a ofrecer.
- Para poder observar el gráfico del perfil retardo potencia de manera más óptima se debe ingresar un número de dispersores mayor a 10 en las variables de entrada.

Esto es porque habrá una mayor cantidad de rayos que recibirá el usuario móvil en la simulación.

5.2. RECOMENDACIONES.

- Se recomienda tener un conocimiento teórico de los diferentes modelos de propagación para el uso adecuado del software de modelos de predicción, así como de los diferentes rangos en los que las variables de entrada de cada uno de los modelos trabajan esto va a permitir obtener resultados precisos a la hora de diseñar una red móvil.
- El software de modelos de predicción permite al usuario variar los parámetros de entrada en un amplio rango por lo que se pueden tener un sinnúmero de combinaciones posibles. Es el usuario entonces el que debería variar estos parámetros y comparar los resultados obtenidos ya que en el presente trabajo se dieron apenas unos ejemplos de lo que el programa es capaz de hacer.
- Se puede realizar una comparación entre las pérdidas obtenidas con diferentes modelos de predicción que cumplan con las mismas características de diseño para así obtener una predicción de pérdidas de propagación que se ajusten más a la realidad.
- Es recomendable para materias que tienen gran cantidad de formulaciones matemáticas, desarrollar herramientas de tipo académico-científicas basadas en Visual C++ y Matlab que permitan la simulación y análisis de los entornos matemáticos para obtener una mejor comprensión de los mismos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SENDIN, Alberto, *Fundamentos de los Sistemas de Comunicaciones Móviles*, 2da Edición, McGraw Hill, España 2004.
- HERNANDO, José; PÉREZ, Fonlan, *Introduction to Mobile Communications Engineering*, 3ra Edición, Artech House, Boston 1999.
- VAUGHAN, Rodney; BACH ANDERSEN, Jorgen: *Channels, Propagation and Antennas for Mobile Communications*, 1era Edición, IEE, USA 2003.
- CAVERS, James, *Mobile Channel Characteristics*, Primera Edición, Springer, USA 2003.
- Comunicaciones móviles y modelos, <http://www.comunidadmovil.com.co>.
- Modelado de la propagación del canal móvil
<http://www.usc.es/ursi99/articulos.html>,
- CDMA, <http://ie.fing.edu.uy/ense/assign/cdma>.
- Radiocomunicaciones móviles, <http://www.itu.int/itudoc/itu-r/publica>.
- PCM, <http://www.comsoc.org/pubs/pcm/>.
- Comunicaciones inalámbricas, <http://www.cio.com/technology/wireless>.
- Programación en Visual C++, Visual Basic y Matlab,
<http://www.thecodeproject.com>.

ANEXO 1

Codificación en Visual C++ del software cccorpmobile.

Codificación en lenguaje C++ del software “*cccormobile*”

```

void mlund::OnCheck1()
{
CButton* pFijardtp1 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_CHECK1);//Variable CButton para check1
double lamda1;
if(pFijardtp1->GetCheck())//si check 1 está fijado...
{
    m_controldtpmlund.EnableWindow(1);//habilitar cuadro de edición dtp
    m_controlhtmlund.EnableWindow(0);//deshabilitar cuadro de edición htm
    m_controlhmmlund.EnableWindow(0);//deshabilitar cuadro de edición hm
}
if(!pFijardtp1->GetCheck())// si check 1 no está fijado...
{
    m_controldtpmlund.EnableWindow(0);//deshabilitar cuadro de edición dtp
    m_controlhtmlund.EnableWindow(1);//habilitar cuadro de edición htm
    m_controlhmmlund.EnableWindow(1);//habilitar cuadro de edición htp
    UpdateData(1);//Actualizar datos
    lamda1=300/(m_fmlund);//calcular lamda
    m_dtpmlund=(4*m_htmlund*m_hmmlund)/lamda1;//calcular dtp
}
}
void mlund::OnButton1()
{
CString d1,d2,d3;//variables CString
double lamda;
CButton* pFijardtp = (CButton*)GetDlgItem(IDC_CHECK1);//variable CButton para check1
i=i+1;
UpdateData(1);//actualizar datos

if(m_n1mlund<1||m_n1mlund>20||m_n2mlund<1||m_n2mlund>20||m_fmlund<400||m_fmlund>2000||m_dmlund<1||m_dmlund>1500||m_dtpmlund<1||m_dtpmlund>1500||m_htmlund<2||m_htmlund>100||m_hmmlund<1||m_hmmlund>10)
    AfxMessageBox("Ingrese los datos correctamente");//validar valores de entrada
else
{
    m_grillamlund.Clear();//borrar grilla
    m_grillamlund.Refresh();//refrescar grilla
if(m_n1mlund<1||m_n1mlund>20||m_n2mlund<1||m_n2mlund>20||m_fmlund<400||m_fmlund>2000||m_dmlund<1||m_dmlund>1500||m_dtpmlund<1||m_dtpmlund>1500||m_htmlund<2||m_htmlund>100||m_hmmlund<1||m_hmmlund>10)
    m_grillamlund.ShowWindow(0);//no mostrar grilla si los datos de entrada no son correctos
else
{
    m_grillamlund.ShowWindow(1);//mostrar grilla
    m_grillamlund.SetColWidth(0,2000);//hacer mas ancha columna 0
    m_grillamlund.SetColWidth(1,800);//hacer mas ancha columna 1
        //calcular k
    lamda=300/(m_fmlund);
    m_kmlund=pow(4*3.141592654/lamda,2);
    //fijar o no dtp
    if(pFijardtp->GetCheck())
    {
        m_controldtpmlund.EnableWindow(1);
        m_controlhtmlund.EnableWindow(0);
        m_controlhmmlund.EnableWindow(0);
    }
}

if(!pFijardtp->GetCheck())

```

```

        {
            m_controldtpmlund.EnableWindow(0);
            m_controlhtmlund.EnableWindow(1);
            m_controlhmmlund.EnableWindow(1);
            UpdateData(1);
            m_dtpmlund=(4*m_htmlund*m_hmmlund)/lamda;
        }
m_lbmlund=10*log10(m_kmlund)+2.5*log10(pow(m_dmlund,4*m_n1mlund)+(pow(m_dtpmlund,4*m_n1
mlund-4*m_n2mlund)*pow(m_dmlund,4*m_n2mlund)));
//validar dtp
    m_grillamlund.SetRow(0);//setear fila 0
    m_grillamlund.SetCol(0);//setear columna 0
    m_grillamlund.SetText("Atenuación L [dB]:");
    d1.Format("%01.2f",m_lbmlund);//imprimir
    m_grillamlund.SetRow(0);
    m_grillamlund.SetCol(1);
    m_grillamlund.SetText(d1);
        m_grillamlund.SetRow(1);//setear fila 1
    m_grillamlund.SetCol(0);//setear columna 0
    m_grillamlund.SetText("Punto de inflexión dtp [m]:");
    d2.Format("%01.2f",m_dtpmlund);//imprimir
    m_grillamlund.SetRow(1);
    m_grillamlund.SetCol(1);
    m_grillamlund.SetText(d2);
        m_grillamlund.SetRow(2);//setear fila 2
    m_grillamlund.SetCol(0);//setear columna 0
    m_grillamlund.SetText("Constante k [dB]: ");
    d3.Format("%01.2f",10*log10(m_kmlund));//imprimir
    m_grillamlund.SetRow(2);
    m_grillamlund.SetCol(1);
    m_grillamlund.SetText(d3);
    }
}
}
{
    CString e1,e2;
    double lamda;
    CButton* pFijardtp = (CButton*)GetDlgItem(IDC_CHECK1);
    j=j+1;
    UpdateData(1);
    if(m_fmuitr<400||m_fmuitr>2000||m_dmuitr<1||m_dmuitr>1500||m_dtpmuitr<1||m_dtpmuitr>1500||m_ht
muitr<2||m_htmuitr>100||m_hmmuitr<1||m_hmmuitr>10)
        AfxMessageBox("Ingrese los datos correctamente");
    else
    {
        m_grillamuitr.Clear();
        m_grillamuitr.Refresh();

        if(m_fmuitr<400||m_fmuitr>2000||m_dmuitr<1||m_dmuitr>1500||m_dtpmuitr<1||m_dtpmuitr>1500||m_ht
muitr<2||m_htmuitr>100||m_hmmuitr<1||m_hmmuitr>10)
            m_grillamuitr.ShowWindow(0);
        else
        {
            m_grillamuitr.ShowWindow(1);
            m_grillamuitr.SetColWidth(0,2300);//hacer mas ancha columna 0
            m_grillamuitr.SetColWidth(1,800);//hacer mas ancha columna 1

            //calcular lamda

```

```

        lamda=300/(m_fmuitr);

        if(pFijardtp->GetCheck())
        {
            m_controldtpmuitr.EnableWindow(1);
            m_controlhtmuitr.EnableWindow(0);
            m_controlhmmuitr.EnableWindow(0);
        }

        if(!pFijardtp->GetCheck())
        {
            m_controldtpmuitr.EnableWindow(0);
            m_controlhtmuitr.EnableWindow(1);
            m_controlhmmuitr.EnableWindow(1);
            UpdateData(1);
            m_dtpmuitr=(4*m_htmuitr*m_hmmuitr)/lamda;
        }

        if(m_dmuitr<m_dtpmuitr/2)
            m_ldmuitr=40+25*log10(m_dmuitr);
        if(m_dmuitr>=m_dtpmuitr/2&& m_dmuitr<4*m_dtpmuitr)
            m_ldmuitr=40+25*log10(m_dtpmuitr/2)+40*log10((2*m_dmuitr)/m_dtpmuitr);
        if(m_dmuitr>=4*m_dtpmuitr)
            m_ldmuitr=40+25*log10(m_dtpmuitr/2)+40*log10(4*m_dtpmuitr)+60*log10(m_dmuitr/(4
            *m_dtpmuitr));

        //presentación de resultados
        m_grillamuitr.SetRow(0);//setear fila 0
        m_grillamuitr.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamuitr.SetText("Atenuación L [dB]:");
        e1.Format("%01.2F",m_ldmuitr);//imprimir
        m_grillamuitr.SetRow(0);
        m_grillamuitr.SetCol(1);
        m_grillamuitr.SetText(e1);
            m_grillamuitr.SetRow(1);//setear fila 1
        m_grillamuitr.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamuitr.SetText("Punto de inflexión dtp [m]:");
        e2.Format("%01.2F",m_dtpmuitr);//imprimir
        m_grillamuitr.SetRow(1);
        m_grillamuitr.SetCol(1);
        m_grillamuitr.SetText(e2);
    }
}
}
void mcl::OnButton2()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here
    double y0,y1,y2,n,phi,ly,uy1,uy2,lt;
    CString e1,e2,e3,e4,e5,e6,e7,e8;
    CButton* pLund2 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO1);
    CButton* pUitr2 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO2);
    CButton* pFijarlos2 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_CHECK1);

    if(!pFijarlos2->GetCheck())
        m_chequear=0;
    if(pUitr2->GetCheck())
        m_lundouitr=1;
    if(pLund2->GetCheck())

```

```

    m_lundouitrmcl=0;
    UpdateData(1);

    if(m_xmcl<1||m_xmcl>1500||m_ymcl<1||m_ymcl>1500||m_wdmcl<1||m_wdmcl>200||m_w1mcl<1||m_w
1mcl>200||m_losmcl<0||m_losmcl>1500||m_xmcl<m_wdmcl||m_ymcl<m_w1mcl)
        AfxMessageBox("Ingrese los datos correctamente");
    else
    {
        m_grillamcl.Clear();
        m_grillamcl.Refresh();

        if(m_xmcl<1||m_xmcl>1500||m_ymcl<1||m_ymcl>1500||m_wdmcl<1||m_wdmcl>200||m_w1mcl<1||m_w
1mcl>200||m_losmcl<0||m_losmcl>1500)
            m_grillamcl.ShowWindow(0);
        else
        {
            m_grillamcl.ShowWindow(1);
            m_grillamcl.SetColWidth(0,2000);//hacer mas ancha columna 0
            m_grillamcl.SetColWidth(1,800);//hacer mas ancha columna 1

            //cálculos y1 y2 yo n phi
            phi=atan(m_w1mcl/(m_xmcl-m_wdmcl));
            y1=10.7*phi+0.22*m_wdmcl+2.99;
            y2=0.62*m_wdmcl+4.9;
            y0=8.92*phi+1.7;
            n=2.75-1.13*exp(-23.4*phi);
            if(y1>0)
                uy1=1;
            if(y1<0)
                uy1=0;
            if(y2>0)
                uy2=1;
            if(y2<0)
                uy2=0;
            ly=(uy1-uy2)*10*log10(pow(y2/y0,n))*((log10(m_ymcl)-log10(y1))/(log10(y2)-
log10(y1)))+uy2*10*log10(pow(m_ymcl/y0,n));

            lt=ly+m_losmcl;
            if(pLund2->GetCheck()&&i1==1&&a1.i>0)
            {
                lt=ly+a1.m_lbmlund;
                m_losmcl=a1.m_lbmlund;
            }

            if(pUitr2->GetCheck()&&i1==1&&a2.j>0)
            {
                lt=ly+a2.m_ldmuitr;
                m_losmcl=a2.m_ldmuitr;
            }
            //presentacion de resultados
            m_grillamcl.SetRow(0);//setear fila 0
            m_grillamcl.SetCol(0);//setear columna 0
            m_grillamcl.SetText("Distancias [m]:");
            m_grillamcl.SetRow(1);//setear fila 1
            m_grillamcl.SetCol(0);//setear columna 0
            m_grillamcl.SetText("y0:");
            e1.Format("%01.2f",y0);//imprimir
            m_grillamcl.SetRow(1);
            m_grillamcl.SetCol(1);

```

```

        m_grillamcl.SetText(e1);
        m_grillamcl.SetRow(2);//setear fila 2
        m_grillamcl.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamcl.SetText("y1:");
        e2.Format("%01.2f",y1);//imprimir
        m_grillamcl.SetRow(2);
        m_grillamcl.SetCol(1);
        m_grillamcl.SetText(e2);
        m_grillamcl.SetRow(3);//setear fila 3
        m_grillamcl.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamcl.SetText("y2:");
        e3.Format("%01.2f",y2);//imprimir
        m_grillamcl.SetRow(3);
        m_grillamcl.SetCol(1);
        m_grillamcl.SetText(e3);
        m_grillamcl.SetRow(4);//setear fila 4
        m_grillamcl.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamcl.SetText("Ángulo phi [rad]:");
        e4.Format("%01.2f",phi);//imprimir
        m_grillamcl.SetRow(4);
        m_grillamcl.SetCol(1);
        m_grillamcl.SetText(e4);
        m_grillamcl.SetRow(5);//setear fila 5
        m_grillamcl.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamcl.SetText("Atenuaciones [dB]:");
        m_grillamcl.SetRow(6);//setear fila 6
        m_grillamcl.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamcl.SetText("Pérdidas LOS:");
        e5.Format("%01.2f",m_losmcl);//imprimir
        m_grillamcl.SetRow(6);
        m_grillamcl.SetCol(1);
        m_grillamcl.SetText(e5);
        m_grillamcl.SetRow(7);//setear fila 7
        m_grillamcl.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamcl.SetText("Pérdidas NLOS L(y):");
        e6.Format("%01.2f",ly);//imprimir
        m_grillamcl.SetRow(7);
        m_grillamcl.SetCol(1);
        m_grillamcl.SetText(e6);
        m_grillamcl.SetRow(8);//setear fila 8
        m_grillamcl.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamcl.SetText("Pérdidas totales Lt:");
        e7.Format("%01.2f",lt);//imprimir
        m_grillamcl.SetRow(8);
        m_grillamcl.SetCol(1);
        m_grillamcl.SetText(e7);
        UpdateData(0);
        i1=0;
    }}}
void mdr::OnButton1()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here
    double sp,s,phi,phip,lamda,lc,lt,lb;
    CString d1,d2,d3,d4,d5,d6,d7;
    UpdateData(1);
    if(m_xmdr<1||m_xmdr>1500||m_ymdr<1||m_ymdr>1500||m_wmdr<1||m_wmdr>200||m_w1mdr<1||m_w1mdr>1200||m_fmdr<400||m_fmdr>2000)
        AfxMessageBox("Ingrese los datos correctamente");
    else

```

```

{
    m_grillamdr.Clear();
    m_grillamdr.Refresh();

    if(m_xmdr<1||m_xmdr>1500||m_ymdr<1||m_ymdr>1500||m_wdmdr<1||m_wdmdr>200||m_wlmdr<1||m_wlmdr>1200||m_fmldr<400||m_fmldr>2000)
        m_grillamdr.ShowWindow(0);
    else{
        m_grillamdr.ShowWindow(1);
        m_grillamdr.SetColWidth(0,3500);//hacer mas ancha columna 0
        m_grillamdr.SetColWidth(1,800);//hacer mas ancha columna 1
        //cálculos de sp,s, phi, phi p lamda y pérdidas
        sp=sqrt(pow(m_xmdr-m_wdmdr,2)+pow(m_wlmdr,2));
        s=sqrt(pow(m_ymdr-m_wlmdr,2)+pow(m_wdmdr,2));
        phi=atan(m_wlmdr/(m_xmdr-m_wdmdr));
        phi=3*3.141592654/2-atan(m_wdmdr/(m_ymdr-m_wlmdr));
        lamda=300/(m_fmldr);
        lc=20.73+10*log10(sp*s*(sp+s))-10*log10(lamda);
        lt=42.71-30*log10(lamda)+10*log10(sp*s*(sp+s));
        lbf=lt-lc;
        //presentación de resultados
        m_grillamdr.SetRow(0);//setear fila 0
        m_grillamdr.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamdr.SetText("Ángulos [rad]:");
        m_grillamdr.SetRow(1);//setear fila 1
        m_grillamdr.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamdr.SetText("Phi´:");
        d1.Format("%01.2f",phi);//imprimir
        m_grillamdr.SetRow(1);
        m_grillamdr.SetCol(1);
        m_grillamdr.SetText(d1);
        m_grillamdr.SetRow(2);//setear fila 2
        m_grillamdr.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamdr.SetText("Phi:");
        d2.Format("%01.2f",phi);//imprimir
        m_grillamdr.SetRow(2);
        m_grillamdr.SetCol(1);
        m_grillamdr.SetText(d2);
        m_grillamdr.SetRow(3);//setear fila 3
        m_grillamdr.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamdr.SetText("Distancias [m]:");
        m_grillamdr.SetRow(4);//setear fila 4
        m_grillamdr.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamdr.SetText("s´:");
        d3.Format("%01.2f",sp);//imprimir
        m_grillamdr.SetRow(4);
        m_grillamdr.SetCol(1);
        m_grillamdr.SetText(d3);
        m_grillamdr.SetRow(5);//setear fila 5
        m_grillamdr.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamdr.SetText("s :");
        d4.Format("%01.2f",s);//imprimir
        m_grillamdr.SetRow(5);
        m_grillamdr.SetCol(1);
        m_grillamdr.SetText(d4);
        m_grillamdr.SetRow(6);//setear fila 6
        m_grillamdr.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamdr.SetText("Atenuaciones [dB]:");
        m_grillamdr.SetRow(7);//setear fila 7
    }
}

```

```

        m_grillamdr.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamdr.SetText("Pérdidas en la difracción de la esquina, Lc :");
        d5.Format("%01.2f",lc);//imprimir
        m_grillamdr.SetRow(7);
        m_grillamdr.SetCol(1);
        m_grillamdr.SetText(d5);
        m_grillamdr.SetRow(8);//setear fila 8
        m_grillamdr.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamdr.SetText("Pérdidas en el espacio libre, Lbf :");
        d6.Format("%01.2f",lbf);//imprimir
        m_grillamdr.SetRow(8);
        m_grillamdr.SetCol(1);
        m_grillamdr.SetText(d6);
        m_grillamdr.SetRow(9);//setear fila 9
        m_grillamdr.SetCol(0);//setear columna 0
        m_grillamdr.SetText("Pérdidas totales, Lt:");
        d7.Format("%01.2f",lt);//imprimir
        m_grillamdr.SetRow(9);
        m_grillamdr.SetCol(1);
        m_grillamdr.SetText(d7);
    }
}
}
void moh::OnChangeEdit1()
{
    UpdateData(1);
    CButton* pOkumuraHata10 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO8);
    CButton* pTipoCiudad10 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_CHECK6);
    CButton* pCostHata10 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO7);
    CButton* pTipoMedio6 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO5);//crear una puntero CButton
    CIUDADMEDIA PEQUEÑA
    CButton* pGranCentro6 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO6);
    if(m_frecuenciamoh==1500){
        pCostHata10->EnableWindow(1);
        pOkumuraHata10->EnableWindow(1);
    }

    if(m_frecuenciamoh>=150 && m_frecuenciamoh<1500){
        pCostHata10->EnableWindow(0);
        pOkumuraHata10->EnableWindow(0);
        pOkumuraHata10->SetCheck(1);
        pCostHata10->SetCheck(0);
        pTipoCiudad10->EnableWindow(0);
        pTipoCiudad10->SetCheck(0);
        pTipoMedio6->EnableWindow(0);
        pGranCentro6->EnableWindow(0);
        m_cm=0;
        if(pTipoMedio6->GetCheck())
            pTipoMedio6->SetCheck(0);

        if(pGranCentro6->GetCheck())
            pGranCentro6->SetCheck(0);
    }

    if(m_frecuenciamoh>1500 && m_frecuenciamoh<=2000){
        pCostHata10->EnableWindow(0);
        pOkumuraHata10->EnableWindow(0);
        pCostHata10->SetCheck(1);
        pOkumuraHata10->SetCheck(0);
    }
}

```

```

        pTipoCiudad10->EnableWindow(1);
    }
}

void moh::OnChangeEdit3()
{
    //validar hm para 1.5
    CButton* pAlturaMovil6 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_CHECK4);
    CButton* pCiudadMedia6 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO3);
    CButton* pCiudadGrande6 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO4);
    UpdateData(1);
    if(m_hmmoh==1.5){
        pAlturaMovil6->EnableWindow(0);
        pCiudadMedia6->EnableWindow(0);
        pCiudadGrande6->EnableWindow(0);
        if(pCiudadMedia6->GetCheck())
            pCiudadMedia6->SetCheck(0);
            if(pCiudadGrande6->GetCheck())
                pCiudadGrande6->SetCheck(0);
        }
    else
    {
        pAlturaMovil6->EnableWindow(1);
        pCiudadMedia6->EnableWindow(1);
        pCiudadGrande6->EnableWindow(1);}
}

void moh::OnButton1()
{
    //Calcular
    CString m_lb;    //lb para imprimir como los de abajo
    CString m_ahm;
    CString m_lbs;
    CString m_lbr;
    CString m_ces;
    CString m_cer;
    CString m_cmp;

    CButton* pZonaSuburbana = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO1);//crear una puntero CButton para
zona urbana
    CButton* pZonaRural = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO2);
    CButton* pCostHata = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO7);
    CButton* pTipoMedio1 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO5);//crear una puntero CButton
CIUDADMEDIA PEQUEÑA
    CButton* pGranCentro1 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO6);
    CButton* pOkumuraHata = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO8);
    CButton* pTipoCiudad5 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_CHECK6);
    UpdateData(1);//se traen los datos de afuera para adentro (sirve para hacer válidas las validaciones)
    if(m_frecuenciamoh<150||m_frecuenciamoh>2000||m_htmoh<30||m_htmoh>200||m_hmmoh<1||m_hmm
oh>10||m_dmoh<1||m_dmoh>20)//validar los datos sino un mensaje no se hacen calculos
        AfxMessageBox("Ingrese los datos correctamente");
    else
    {
        m_grillamoh.Clear();
        m_grillamoh.Refresh();
        if(m_frecuenciamoh<150||m_frecuenciamoh>2000||m_hmmoh<1||m_hmmoh>10||m_dmoh<1||m_dmoh>
20)//validar solo a los valores que da el modelo
            m_grillamoh.ShowWindow(0);//ocultar la grilla
    }
}

```

```

else
{
m_grillamoh.ShowWindow(1);//Mostrar la grilla
m_grillamoh.SetColWidth(0,3400);//hacer mas ancha columna 0
m_grillamoh.SetColWidth(1,1500);//hacer mas ancha columna 1
m_grillamoh.SetRow(0);//setear fila 0
m_grillamoh.SetCol(0);//setear columna 1
m_grillamoh.SetText("      RESULTADOS");//poner título [0 0]
m_grillamoh.SetRow(1);
m_grillamoh.SetCol(0);
m_grillamoh.SetText(" - Corrección, a(hm) [dB]");
m_grillamoh.SetRow(2);
m_grillamoh.SetCol(0);
m_grillamoh.SetText(" - Pérdida básica, Lb [dB]");
m_grillamoh.SetRow(3);
m_grillamoh.SetCol(0);
m_grillamoh.SetText(" - Constante cm [dB] para COST 231 - Hata");
m_grillamoh.SetRow(4);
m_grillamoh.SetCol(0);
m_grillamoh.SetText(" CORRECCIÓN A Lb POR ENTORNO DEL Rx");
m_grillamoh.SetRow(5);
m_grillamoh.SetCol(0);
m_grillamoh.SetText(" - Corrección del entorno [dB]");
m_grillamoh.SetRow(5);
m_grillamoh.SetCol(1);
m_grillamoh.SetText("0.00");
m_grillamoh.SetRow(6);
m_grillamoh.SetCol(0);
m_grillamoh.SetText(" - Atenuación total corregida [dB]");
if(m_frecuenciamoh>=150 && m_frecuenciamoh<1500){frecuencia válida para cálculo modelo okumura
hata
    pCostHata->EnableWindow(0);
    pOkumuraHata->EnableWindow(0);
    pOkumuraHata->SetCheck(1);
    pCostHata->SetCheck(0);
}
if(pOkumuraHata->GetCheck()){calcular lb con okumura hata
    m_lbmoh=69.55+26.26*(log(m_frecuenciamoh)/log(10))-13.82*(log(m_htmoh)/log(10))-
m_ahmmoh+(44.9-6.55*(log(m_htmoh)/log(10)))*(log(m_dmoh)/log(10));
}
if(pCostHata->GetCheck()){calcular lb modelo cost hata
    if(pTipoMedio1->GetCheck())
        m_cm=0;
    if(pGranCentro1->GetCheck())
        m_cm=3;
    m_lbmoh=46.3+33.9*(log(m_frecuenciamoh)/log(10))-13.82*(log(m_htmoh)/log(10))-
m_ahmmoh+(44.9-6.55*(log(m_htmoh)/log(10)))*(log(m_dmoh)/log(10))+m_cm;
}
m_lb.Format("%01.2f",m_lbmoh);//imprimir Lb
m_grillamoh.SetRow(2);
m_grillamoh.SetCol(1);
m_grillamoh.SetText(m_lb);
m_ahm.Format("%01.2f",m_ahmmoh);//imprimir ahm
m_grillamoh.SetRow(1);
m_grillamoh.SetCol(1);
m_grillamoh.SetText(m_ahm);
m_cmp.Format("%01.2f",m_cm);//imprimir m_cm
m_grillamoh.SetRow(3);
m_grillamoh.SetCol(1);

```

```

m_grillamoh.SetText(m_cmp);
if(pZonaSuburbana->GetCheck()){
    m_lbsmoh=m_lbmoh+m_cesmoh;
    m_lbs.Format("%01.2f",m_lbsmoh);//imprimir total suburbano
    m_grillamoh.SetRow(6);
    m_grillamoh.SetCol(1);
    m_grillamoh.SetText(m_lbs);}
if(pZonaRural->GetCheck()){
    m_lbrmoh=m_lbmoh+m_cermoh;
    m_lbr.Format("%01.2f",m_lbrmoh);//imprimir total rural
    m_grillamoh.SetRow(6);
    m_grillamoh.SetCol(1);
    m_grillamoh.SetText(m_lbr);}
if(!pZonaRural->GetCheck()&&!pZonaSuburbana->GetCheck()){
    m_lb.Format("%01.2f",m_lbmoh);//imprimir Lb
    m_grillamoh.SetRow(6);
    m_grillamoh.SetCol(1);
    m_grillamoh.SetText(m_lb);
}
if(pZonaSuburbana->GetCheck()){
    m_grillamoh.SetRow(5);
    m_grillamoh.SetCol(0);
    m_grillamoh.SetText(" - Corrección del entorno suburbano [dB]");
    m_ces.Format("%01.2f",m_cesmoh);//imprimir corrección suburbano
    m_grillamoh.SetRow(5);
    m_grillamoh.SetCol(1);
    m_grillamoh.SetText(m_ces);}
if(pZonaRural->GetCheck()){
    m_grillamoh.SetRow(5);
    m_grillamoh.SetCol(0);
    m_grillamoh.SetText(" - Corrección del entorno rural [dB]");
    m_cer.Format("%01.2f",m_cermoh);//imprimir correccion rural
    m_grillamoh.SetRow(5);
    m_grillamoh.SetCol(1);
    m_grillamoh.SetText(m_cer);}
    UpdateData(0);//enviar datos para afuera
}
}
}
void moh::OnRadio1()
{
    // zona suburbana
    m_cesmoh=-2*pow((log(m_frecuenciamoh/28)/log(10)),2)-5.4;
}
void moh::OnRadio2()
{
    //Zona Rural
    m_cermoh=-4.78*pow((log(m_frecuenciamoh)/log(10)),2)+18.33*(log(m_frecuenciamoh)/log(10))-
40.94;
}

void moh::OnRadio3()
{
    //ciudad media pequeña
    m_ahmmoh=(1.1*(log(m_frecuenciamoh)/log(10))-0.7)*m_hmmoh-
(1.56*(log(m_frecuenciamoh)/log(10))-0.8);
}

void moh::OnRadio4()

```

```

{
    //ciudad grande
    if(m_frecuenciamoh<=200)
        m_ahmmoh=8.29*pow((log(1.54*m_hmmoh)/log(10)),2)-1.1;
    if(m_frecuenciamoh>=400)
        m_ahmmoh=3.2*pow((log(11.75*m_hmmoh)/log(10)),2)-4.97;
    if(m_frecuenciamoh>200&& m_frecuenciamoh<400)
        m_ahmmoh=(1.1*(log(m_frecuenciamoh)/log(10))-0.7)*m_hmmoh-
(1.56*(log(m_frecuenciamoh)/log(10))-0.8);
}

void moh::OnRadio7()
{
    //cost hata
    CButton* pTipoCiudad = (CButton*)GetDlgItem(IDC_CHECK6);
    CButton* pCostHata1 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO7);
    CButton* pTipoMedio1 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO5);//crear una puntero CButton
CIUDADMEDIA PEQUEÑA
    CButton* pGranCentro1 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO6);
    if(pCostHata1->GetCheck()){
        pTipoCiudad->EnableWindow(1);
    }
    if(!pCostHata1->GetCheck()){
        pTipoCiudad->EnableWindow(0);
        pTipoMedio1->EnableWindow(0);
        pGranCentro1->EnableWindow(0);
    }
    if(pTipoMedio1->GetCheck())
        pTipoMedio1->SetCheck(0);
    if(pGranCentro1->GetCheck())
        pGranCentro1->SetCheck(0);
    m_cm=0;
}

void moh::OnRadio8()
{
    CButton* pTipoCiudad5 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_CHECK6);
    CButton* pOkumuraHata5 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO8);
    CButton* pTipoMedio5 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO5);//crear una puntero CButton
CIUDADMEDIA PEQUEÑA
    CButton* pGranCentro5 = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO6);
    if(pOkumuraHata5->GetCheck()){
        pTipoCiudad5->EnableWindow(0);
        pTipoMedio5->EnableWindow(0);
        pGranCentro5->EnableWindow(0);
    }
    if(pTipoMedio5->GetCheck())
        pTipoMedio5->SetCheck(0);
    if(pGranCentro5->GetCheck())
        pGranCentro5->SetCheck(0);
    m_cm=0;
}

void megli::OnButton1()
{
    CString aa1;
    UpdateData(1);//actualizar datos d entrada
if(m_dmegli<0.5||m_dmegli>20||m_fmegli<40||m_fmegli>1000||m_hbmegli<1||m_hbmegli>400||m_hmmegli
<1||m_hmmegli>10)//validar datos de entrada
    AfxMessageBox("Ingrese los datos correctamente ");
    else {

```

```

        m_grillamegli.Clear();
        m_grillamegli.Refresh();
if(m_dmegli<0.5||m_dmegli>20||m_fmegli<40||m_fmegli>1000||m_hbmegli<1||m_hbmegli>400||m_hmmegli
<1||m_hmmegli>10)//validar datos de entrada
        m_grillamegli.ShowWindow(0);//ocultar la grilla
        else{
            m_grillamegli.ShowWindow(1);//Mostrar la grilla
                a1=40*log10(m_dmegli)-
                20*log10(m_hbmegli*m_hmmegli)+20*log10(m_fmegli/40);//calcular //pérdidas
            m_grillamegli.SetColWidth(0,2000);//hacer mas ancha columna 0
            m_grillamegli.SetColWidth(1,1400);//hacer mas ancha columna 1
            m_grillamegli.SetRow(0);//setear fila 0
            m_grillamegli.SetCol(0);//setear columna 0
            m_grillamegli.SetText("Pérdidas Totales (dB) :");//poner título [0 0]
            aa1.Format("%01.2f",a1);//imprimir
            m_grillamegli.SetRow(0);
            m_grillamegli.SetCol(1);
            m_grillamegli.SetText(aa1);}}
void mik::OnButton1()
{
    CString m_lbi;    //lb para imprimir como los de abajo
    UpdateData(1);//traer los datos de afuera hacia adentro

if(m_fmik<400||m_fmik>2000||m_dmik<0.5||m_dmik>20||m_irmik<0||m_irmik>10||m_wmik<1||m_wmik>2
00||m_hmik<1||m_hmik>400||m_phimik<0||m_phimik>90)
    AfxMessageBox("Ingrese los datos correctamente.");
    else {
        m_grillamik.Clear();
        m_grillamik.Refresh();
if(m_fmik<400||m_fmik>2000||m_dmik<0.5||m_dmik>20||m_irmik<0||m_irmik>10||m_wmik<1||m_wmik>2
00||m_hmik<1||m_hmik>400||m_phimik<0||m_phimik>90)
        m_grillamik.ShowWindow(0);//ocultar la grilla
        else
            m_grillamik.ShowWindow(1);//Mostrar la grilla
            m_lbmik=26.65+30*(log(m_fmik)/log(10))+20*(log(m_dmik)/log(10))-
            10*(log(1+(3/pow(m_irmik,2)))/log(10))-10*(log(m_wmik)/log(10))+20*(log(m_hmik-
            m_hrmik)/log(10))+10*(log(sin(m_phimik*3.141592654/180))/log(10));
            m_grillamik.SetColWidth(0,3400);//hacer mas ancha columna 0
            m_grillamik.SetColWidth(1,1400);//hacer mas ancha columna 1
            m_grillamik.SetRow(0);//setear fila 0
            m_grillamik.SetCol(0);//setear columna 0
            m_grillamik.SetText("Pérdidas básicas Lb (dB) :");//poner título [0 0]
            m_lbi.Format("%01.2f",m_lbmik);//imprimir Lb
            m_grillamik.SetRow(0);
            m_grillamik.SetCol(1);
            m_grillamik.SetText(m_lbi);
            UpdateData(0);//enviar datos de afuera hacia adentro
        }
    }
}
void mik::OnChangeEdit5()
{
    UpdateData(1);
    CButton *pirmik = (CButton*)GetDlgItem(IDC_CHECK1);//puntero button para validar ir
    if(m_fmik>30&& m_fmik<300&&!pirmik->GetCheck()){
        m_irmik=2;
        UpdateData(0);}
    if(m_fmik>300&& m_fmik<3000&&!pirmik->GetCheck()){
        m_irmik=3.2;
        UpdateData(0);}
}

```

```

}
void mik::OnButton2()
{
    informacionikegami a;
    a.DoModal();
}
void msk::OnButton1()
{
    CString b1;
    UpdateData(1);
if(m_hmsk>m_hbomsk)
    AfxMessageBox("La altura media de los edificios alrededor de la estación base H debe ser inferior a la
altura de la estación base respecto al punto de recepción hbo");
if(m_hmsk<1||m_hmsk>400||m_hpmsk<5||m_hpmsk>50||m_hbmsk<20||m_hbmsk>100||m_hbomsk<20||m_h
bomsk>100||m_hmsk<5||m_hmsk>80||m_wmsk<5||m_wmsk>50||m_phimsk<0||m_phimsk>90||m_fmksk<45
0||m_fmksk>2200||m_dmsk<0.5||m_dmsk>10||m_hmsk>m_hbomsk)
    AfxMessageBox("Ingrese los datos correctamente");
    else
    {
        m_grillamsk.Clear();
        m_grillamsk.Refresh();
if(m_hmsk<1||m_hmsk>400||m_hpmsk<5||m_hpmsk>50||m_hbmsk<20||m_hbmsk>100||m_hbomsk<20||m_h
bomsk>100||m_hmsk<5||m_hmsk>80||m_wmsk<5||m_wmsk>50||m_phimsk<0||m_phimsk>90||m_fmksk<45
0||m_fmksk>2200||m_dmsk<0.5||m_dmsk>10||m_hmsk>m_hbomsk)
        m_grillamsk.ShowWindow(0);
        else
        {
            m_grillamsk.ShowWindow(1);
            m_lbmsk=100-
7.1*log10(m_wmsk)+0.023*m_phimsk+1.4*log10(m_hmsk)+6.1*log10(m_hpmsk)-(24.37-
3.7*pow(m_hmsk/m_hbomsk,2))*log10(m_hbmsk)+(43.2-
3.1*log10(m_hbmsk))*log10(m_dmsk)+20*log10(m_fmksk)+exp(13*(log10(m_fmksk)-3.23));
            m_grillamsk.SetColWidth(0,2500);//hacer mas ancha columna 0
            m_grillamsk.SetColWidth(1,1400);//hacer mas ancha columna 1
            m_grillamsk.SetRow(0);//setear fila 0
            m_grillamsk.SetCol(0);//setear columna 0
            m_grillamsk.SetText("Pérdida Básica Lb (dB) :");//poner título [0 0]
            b1.Format("%01.2f",m_lbmsk);//imprimir
            m_grillamsk.SetRow(0);
            m_grillamsk.SetCol(1);
            m_grillamsk.SetText(b1);
        }
    }
}
void msk::OnButton2()
{
    informacionmsk b2;
    b2.DoModal();
}
void mwb::OnButton1()
{
    CString a1,a2,a3,a4; //imprimir en la grilla
    UpdateData(1);
if(m_hmwb<1||m_hmwb>400||m_hmmwb<1||m_hmmwb>10||m_hrmwb<1||m_hrmwb>400||m_bmwb<1||
m_bmwb>200||m_fmwb<400||m_fmwb>2000||m_dmwb<0.5||m_dmwb>20)
    AfxMessageBox("Ingrese correctamente los datos");
    else
    {
        m_grillamwb.Clear();
        m_grillamwb.Refresh();

```

```

if(m_hmwb<1||m_hmwb>400||m_hmmwb<1||m_hmmwb>10||m_hrmwb<1||m_hrmwb>400||m_bmwb<1||
m_bmwb>200||m_fmwb<400||m_fmwb>2000||m_dmwb<0.5||m_dmwb>20)
    m_grillamwb.ShowWindow(0);//ocultar la grilla
else
    m_grillamwb.ShowWindow(1);//Mostrar la grilla
    m_amwb=5*log10(pow(m_bmwb/2,2)+pow(m_hrmwb-m_hmmwb,2))-
    9*log10(m_bmwb)+20*log10(atan(2*(m_hrmwb-m_hmmwb)/m_bmwb));
    m_lbmwb=57.1+m_amwb+log10(m_fmwb)+18*log10(m_dmwb)-18*log10(1-
    (pow(m_dmwb,2)/(17*m_hmwb)))-18*log10(m_hmwb);
    m_ltotmwb=89.55+m_amwb+21*log10(m_fmwb)+38*log10(m_dmwb)-18*log10(1-
    (pow(m_dmwb,2)/(17*m_hmwb)))-18*log10(m_hmwb);
    m_lbfmwb=m_ltotmwb-m_lbmwb;
    m_grillamwb.SetColWidth(0,3400);//hacer mas ancha columna 0
    m_grillamwb.SetColWidth(1,1400);//hacer mas ancha columna 1
    m_grillamwb.SetRow(0);//setear fila 0
    m_grillamwb.SetCol(0);//setear columna 0
    m_grillamwb.SetText("Influencia edificios A (dB) :");//poner título [0 0]
    a1.Format("%01.2f",m_amwb);//imprimir
    m_grillamwb.SetRow(0);
    m_grillamwb.SetCol(1);
    m_grillamwb.SetText(a1);
    m_grillamwb.SetRow(1);//setear fila
    m_grillamwb.SetCol(0);//setear columna
    m_grillamwb.SetText("Pérdidas básicas del método Lb (dB) :");//poner título [0 0]
    a2.Format("%01.2f",m_lbmwb);//imprimir
    m_grillamwb.SetRow(1);
    m_grillamwb.SetCol(1);
    m_grillamwb.SetText(a2);
    m_grillamwb.SetRow(2);//setear fila
    m_grillamwb.SetCol(0);//setear columna
    m_grillamwb.SetText("Pérdidas en el espacio libre Lbf (dB) :");//poner título [0 0]
    a3.Format("%01.2f",m_lbfmwb);//imprimir Lbf
    m_grillamwb.SetRow(2);
    m_grillamwb.SetCol(1);
    m_grillamwb.SetText(a3);
    m_grillamwb.SetRow(3);//setear fila
    m_grillamwb.SetCol(0);//setear columna
    m_grillamwb.SetText("Influencia edificios A (dB) :");
    a4.Format("%01.2f",m_ltotmwb);//imprimir Lbtot
    m_grillamwb.SetRow(3);
    m_grillamwb.SetCol(1);
    m_grillamwb.SetText(a4);
}
}
void mwb::OnButton2()
{
    informacionmwb b;
    b.DoModal();
}
void mcost::OnButton1()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here
    CString c1,c2,c3,c4,c5,c6,c7,c8,c9,c10,c11,c12;
    CButton* pCiudadPequena = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO1);
    CButton* pCiudadGrande = (CButton*)GetDlgItem(IDC_RADIO2);
    UpdateData(1);
}

```

```

if(m_hbmcost<1|m_hbmcost>400|m_hrmcost<1|m_hrmcost>400|m_hmmcst<1|m_hmmcst>10|m_w
mcost<1|m_wmcost>200|m_bmcost<1|m_bmcost>400|m_phimcost<0|m_phimcost>90|m_fmcost<400|m
_fmcost>2000|m_dmcost<0.5|m_dmcost>20)
    AfxMessageBox("Ingrese los datos correctamente");
else
{
    m_grilla1mcost.Clear();
    m_grilla1mcost.Refresh();
    m_grilla2mcost.Clear();
    m_grilla2mcost.Refresh();

if(m_hbmcost<1|m_hbmcost>400|m_hrmcost<1|m_hrmcost>400|m_hmmcst<1|m_hmmcst>10|m_w
mcost<1|m_wmcost>200|m_bmcost<1|m_bmcost>400|m_phimcost<0|m_phimcost>90|m_fmcost<400|m
_fmcost>2000|m_dmcost<0.5|m_dmcost>20)
{
    m_grilla1mcost.ShowWindow(0);
    m_grilla2mcost.ShowWindow(0);}
else
{
    m_grilla1mcost.ShowWindow(1);
    m_grilla2mcost.ShowWindow(1);
    m_grilla1mcost.SetColWidth(0,2000);//hacer mas ancha columna 0
    m_grilla1mcost.SetColWidth(1,800);//hacer mas ancha columna 1
    m_grilla2mcost.SetColWidth(0,2000);//hacer mas ancha columna 0
    m_grilla2mcost.SetColWidth(1,800);//hacer mas ancha columna 1
    m_dhrmcost=m_hrmcost-m_hmmcst;//calcular dhr
    m_dhbmcost=m_hbmcost-m_hrmcost;//calcular dhb
    //calcular lori
    if(m_phimcost>=0&&m_phimcost<35)
        m_lorimcost=-10+0.3571*m_phimcost;
    if(m_phimcost>=35&&m_phimcost<55)
        m_lorimcost=2.5+0.075*(m_phimcost-35);
    if(m_phimcost>=55&&m_phimcost<=90)
        m_lorimcost=4-0.114*(m_phimcost-55);
    //calcular lrts
    m_lrtsmcost=-16.9-
        10*log10(m_wmcost)+10*log10(m_fmcost)+20*log10(m_dhrmcost)+m_lorimcost;
    if(m_lrtsmcost<0)
        m_lrtsmcost=0;

    //calcular kf
    if(pCiudadPequena->GetCheck())
        m_kfmcost=-4+0.7*(m_fmcost/925-1);

    if(pCiudadGrande->GetCheck())
        m_kfmcost=-4+1.5*(m_fmcost/925-1);

    //calcular kd
    if(m_dhbmcost>=0)
        m_kdmcost=18;
    if(m_dhbmcost<0)
        m_kdmcost=18-15*(m_dhbmcost/m_hrmcost);
    //calcular ka
    if(m_hbmcost>=0)
        m_kamcost=54;
    if(m_hbmcost<0&&m_dmcost>=0.5)
        m_kamcost=54-0.8*m_dhbmcost;
    if(m_hbmcost<0&&m_dmcost<0.5)
        m_kamcost=54-1.6*m_dhbmcost*m_dmcost;

```

```

//calcular lbsh
m_lbshmcost=-18*log10(1+m_dhbmcost);
//calcular lmsd
m_lmsdmcost=m_lbshmcost+m_kamcost+m_kdmcost*log10(m_dmcost)+m_kfmcost*log10(m_fm
cost)-9*log10(m_bmcost);
//calcular lbf
m_lbfmcost=32.45+20*log10(m_fmcost)+20*log10(m_dmcost);
//calcular lb
m_lbmcost=m_lbfmcost+m_lrtsmcost+m_lmsdmcost;
//grilla 1
m_grilla1mcost.SetRow(0);//setear fila 0
m_grilla1mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla1mcost.SetText("Parámetros intermedios");
m_grilla1mcost.SetRow(1);//setear fila 1
m_grilla1mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla1mcost.SetText("Geométricos: ");
m_grilla1mcost.SetRow(2);//setear fila 2
m_grilla1mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla1mcost.SetText("Phi [°]: ");
c1.Format("%01.2f",m_phimcost);//imprimir
m_grilla1mcost.SetRow(2);
m_grilla1mcost.SetCol(1);
m_grilla1mcost.SetText(c1);
m_grilla1mcost.SetRow(3);//setear fila 3
m_grilla1mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla1mcost.SetText("delta hb [m]: ");
c2.Format("%01.2f",m_dhbmcost);//imprimir
m_grilla1mcost.SetRow(3);
m_grilla1mcost.SetCol(1);
m_grilla1mcost.SetText(c2);
m_grilla1mcost.SetRow(4);//setear fila 4
m_grilla1mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla1mcost.SetText("delta hr [m]: ");
c3.Format("%01.2f",m_dhrmcost);//imprimir
m_grilla1mcost.SetRow(4);
m_grilla1mcost.SetCol(1);
m_grilla1mcost.SetText(c3);
m_grilla1mcost.SetRow(5);//setear fila 5
m_grilla1mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla1mcost.SetText("Coeficientes k ");
m_grilla1mcost.SetRow(6);//setear fila 6
m_grilla1mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla1mcost.SetText("ka: ");
c4.Format("%01.2f",m_kamcost);//imprimir
m_grilla1mcost.SetRow(6);
m_grilla1mcost.SetCol(1);
m_grilla1mcost.SetText(c4);
m_grilla1mcost.SetRow(7);//setear fila 7
m_grilla1mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla1mcost.SetText("kd: ");
c5.Format("%01.2f",m_kdmcost);//imprimir
m_grilla1mcost.SetRow(7);
m_grilla1mcost.SetCol(1);
m_grilla1mcost.SetText(c5);
m_grilla1mcost.SetRow(8);//setear fila 8
m_grilla1mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla1mcost.SetText("kf: ");
c6.Format("%01.2f",m_kfmcost);//imprimir
m_grilla1mcost.SetRow(8);

```

```

m_grilla1mcost.SetCol(1);
m_grilla1mcost.SetText(c6);
//grilla 2
m_grilla2mcost.SetRow(0);//setear fila 0
m_grilla2mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla2mcost.SetText("Atenuaciones");
m_grilla2mcost.SetRow(1);//setear fila 1
m_grilla2mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla2mcost.SetText("Lbf [dB]: ");
c7.Format("%01.2f",m_lbfmcost);//imprimir
m_grilla2mcost.SetRow(1);
m_grilla2mcost.SetCol(1);
m_grilla2mcost.SetText(c7);
m_grilla2mcost.SetRow(2);//setear fila 2
m_grilla2mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla2mcost.SetText("Lori [dB]: ");
c8.Format("%01.2f",m_lorimcost);//imprimir
m_grilla2mcost.SetRow(2);
m_grilla2mcost.SetCol(1);
m_grilla2mcost.SetText(c8);
        m_grilla2mcost.SetRow(3);//setear fila 3
m_grilla2mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla2mcost.SetText("Lrts [dB]: ");
c9.Format("%01.2f",m_lrtsmcost);//imprimir
m_grilla2mcost.SetRow(3);
m_grilla2mcost.SetCol(1);
m_grilla2mcost.SetText(c9);
m_grilla2mcost.SetRow(4);//setear fila 4
m_grilla2mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla2mcost.SetText("Lbsh [dB]: ");
c10.Format("%01.2f",m_lbshmcost);//imprimir
m_grilla2mcost.SetRow(4);
m_grilla2mcost.SetCol(1);
m_grilla2mcost.SetText(c10);
m_grilla2mcost.SetRow(5);//setear fila 5
m_grilla2mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla2mcost.SetText("Lmsd [dB]: ");
c11.Format("%01.2f",m_lmsdmcost);//imprimir
m_grilla2mcost.SetRow(5);
m_grilla2mcost.SetCol(1);
m_grilla2mcost.SetText(c11);
m_grilla2mcost.SetRow(6);//setear fila 6
m_grilla2mcost.SetCol(0);//setear columna 0
m_grilla2mcost.SetText("Lb [dB]: ");
c12.Format("%01.2f",m_lbmcost);//imprimir
m_grilla2mcost.SetRow(6);
m_grilla2mcost.SetCol(1);
m_grilla2mcost.SetText(c12);
    }
}
}
void mcost::OnRadio1()
{
    m_kfmcost=-4+0.7*(m_fmcost/925-1);
}

void mcost::OnRadio2()
{
    m_kfmcost=-4+1.5*(m_fmcost/925-1);
}

```

```

}
void mcost::OnButton2()
{
    infcost andromeda;
    andromeda.DoModal();
}
void scm::OnButton1()
{
    int i=0,j=0;
    const int N=3;//valores de ángulo
    const int M=4000;//valores de distancias grandes
    const int O=500;//distancias pequeñas
    const int R=1;
    double a,b,c,p,r,d,e11,fd,g,l,x=0;
    CString a1,a2,a3,a4,a5;
    y=0;
    UpdateData(1);//traer los datos ingresados por el usuario
    srand( (unsigned)time( NULL ) );
    //validación de datos de entrada.
    if(m_ndscm<1|m_ndscm>99|m_vmscm<4|m_vmscm>400|m_fscm<400|m_fscm>2200|m_rrscm<1|m
_rrscm>100|m_pprscm<-90|m_pprscm>0|m_dppusc<3|m_dppusc>90)
        AfxMessageBox("Ingrese los datos correctamente");
    else
    {
        if(m_ndscm<1|m_ndscm>99|m_vmscm<4|m_vmscm>400|m_fscm<400|m_fscm>2200|m_rrscm<1|m
_rrscm>100|m_pprscm<-90|m_pprscm>0|m_dppusc<3|m_dppusc>90)
        {
            m_grilla1scm.ShowWindow(0);//no mostrar grilla 1
            m_grilla2scm.ShowWindow(0);//no mostrar grilla 2
            b1.SetWindowText("Parámetros de simulación");//cambiar de título
            b2.ShowWindow(1);
            b3.ShowWindow(1);
            b4.ShowWindow(1);
            b5.ShowWindow(1);
            b6.ShowWindow(1);
            b7.ShowWindow(1);
            b8.ShowWindow(1);
            c1.ShowWindow(1);
            c2.ShowWindow(1);
            c3.ShowWindow(1);
            c4.ShowWindow(1);
            c5.ShowWindow(1);
            c6.ShowWindow(1);
            c7.ShowWindow(1);
            d1.ShowWindow(1);
            d2.ShowWindow(0);
        }
    }
    else
    {
        //mostrar y ocultar parámetros
        m_grilla1scm.SetColWidth(0,1175);//hacer mas ancha columna 0
        m_grilla1scm.SetColWidth(3,1150);//hacer mas ancha columna 3
        m_grilla2scm.SetColWidth(0,2300);//hacer mas ancha columna 0
        m_grilla1scm.ShowWindow(1);//mostrar grilla 1
        m_grilla2scm.ShowWindow(1);//mostrar grilla 2
        b1.SetWindowText("Resultados de la simulación");//cambiar de título
        b2.ShowWindow(0);
        b3.ShowWindow(0);
        b4.ShowWindow(0);
    }
}

```

```

b5.ShowWindow(0);
b6.ShowWindow(0);
b7.ShowWindow(0);
b8.ShowWindow(0);
c1.ShowWindow(0);
c2.ShowWindow(0);
c3.ShowWindow(0);
c4.ShowWindow(0);
c5.ShowWindow(0);
c6.ShowWindow(0);
c7.ShowWindow(0);
d1.ShowWindow(0);
d2.ShowWindow(1);
//cálculos
m_dscm=300*m_rrscm*m_ndscm;//calcular distancia entre Tx y Rx
m_lamdascm=300/m_fscm;//calcular longitud de onda
m_ptxscm=pow(10,m_pprscm/10)*pow(4*3.1416*m_dscm/m_lamdascm,2);Pt
m_ttsscm=m_dscm/m_vmescm;//calcular tiempo total simulado
fd=(m_vmescm*10/36)/m_lamdascm;
//rellenar grilla 1 con títulos
for(i=2;i<=m_ndscm+1;i++)//rellenar grilla con títulos
{
    m_grilla1scm.SetRow(i);
    m_grilla1scm.SetCol(0);
    m_grilla1scm.SetText("Dispensor :");
}
//poner títulos en grilla 1
m_grilla1scm.SetRow(0);
m_grilla1scm.SetCol(0);
m_grilla1scm.SetText("Rayos");
m_grilla1scm.SetRow(0);
m_grilla1scm.SetCol(1);
m_grilla1scm.SetText("Pot [dB]");
m_grilla1scm.SetRow(0);
m_grilla1scm.SetCol(2);
m_grilla1scm.SetText("Retardo [us]");
m_grilla1scm.SetRow(0);
m_grilla1scm.SetCol(3);
m_grilla1scm.SetText("Doppler [Hz]");
m_grilla1scm.SetRow(0);
m_grilla1scm.SetCol(4);
m_grilla1scm.SetText("Fase [°]");
//poner título en rayo directo
m_grilla1scm.SetRow(1);
m_grilla1scm.SetCol(0);
m_grilla1scm.SetText("Rayo directo");
//calcular potencia
for(j=1;j<=m_ndscm+1;j++)//rellenar grilla con valores randómicos
{
    a = (int) M * rand() / (RAND_MAX + 1.0);//distancia mayor
    b = (int) O * rand() / (RAND_MAX + 1.0);//distancia menor
    c = (int) R * rand() / (RAND_MAX + 1.0);//coeficiente de r
p=10*log10(m_ptxscm*pow(c*m_lamdascm/(4*3.1416*(a+b)),2));
    if(p>=-10*log10(m_ptxscm)&& m_ndscm>20)
        p=p-30;
    a1.Format("%01.2f",p);
    m_grilla1scm.SetRow(j);
    m_grilla1scm.SetCol(1);
    m_grilla1scm.SetText(a1);
}

```

```

//retardo
d=a+b;
r=d/300;
a2.Format("%01.2f",r);
m_grilla1scm.SetRow(j);
m_grilla1scm.SetCol(2);
m_grilla1scm.SetText(a2);
if(r>y)
    y=r;
//doppler
e11 = (int) N * rand() / (RAND_MAX + 1.0);//angulo rad
g=fd*cos(e11);
a3.Format("%01.2f",g);
m_grilla1scm.SetRow(j);
m_grilla1scm.SetCol(3);
m_grilla1scm.SetText(a3);
if(g>x)
    x=g;
//fase
a4.Format("%01.2f",e11*180/3.1416);
m_grilla1scm.SetRow(j);
m_grilla1scm.SetCol(4);
m_grilla1scm.SetText(a4);
}
//setear primer retardo
l = (int) R * rand() / (RAND_MAX + 1.0);//angulo en rad
a5.Format("%01.2f",l/5);
m_grilla1scm.SetRow(1);
m_grilla1scm.SetCol(2);
m_grilla1scm.SetText(a5);
//llenar grilla dos
m_grilla2scm.SetRow(0);
m_grilla2scm.SetCol(0);
m_grilla2scm.SetText("Parámetros de simulación");
m_grilla2scm.SetRow(1);
m_grilla2scm.SetCol(0);
m_grilla2scm.SetText("Velocidad [Km/h]:");
m_grilla2scm.SetRow(2);
m_grilla2scm.SetCol(0);
m_grilla2scm.SetText("Distancia recorrida [m]:");
m_grilla2scm.SetRow(3);
m_grilla2scm.SetCol(0);
m_grilla2scm.SetText("Frecuencia portadora [MHz]:");
m_grilla2scm.SetRow(4);
m_grilla2scm.SetCol(0);
m_grilla2scm.SetText("Número de rayos recibidos:");
m_grilla2scm.SetRow(5);
m_grilla2scm.SetCol(0);
m_grilla2scm.SetText("Retardo máximo [us]:");
m_grilla2scm.SetRow(6);
m_grilla2scm.SetCol(0);
m_grilla2scm.SetText("Máxima variación Doppler [Hz]:");
m_grilla2scm.SetRow(7);
m_grilla2scm.SetCol(0);
m_grilla2scm.SetText("Tiempo total simulado [s]:");
m_grilla2scm.SetRow(8);
m_grilla2scm.SetCol(0);
m_grilla2scm.SetText("Máximo Doppler teórico [MHz]:");
//llenar grilla con datos

```

```
        m_grilla2scm.SetRow(1);
        m_grilla2scm.SetCol(1);
        a5.Format("%01.2f",m_vmscm);
        m_grilla2scm.SetText(a5);
        m_grilla2scm.SetRow(2);
        m_grilla2scm.SetCol(1);
        m_grilla2scm.SetText("10");
        m_grilla2scm.SetRow(3);
        m_grilla2scm.SetCol(1);
        a5.Format("%01.2f",m_fmscm);
        m_grilla2scm.SetText(a5);
        m_grilla2scm.SetRow(4);
        m_grilla2scm.SetCol(1);
        a5.Format("%d",m_ndscm+1);
        m_grilla2scm.SetText(a5);
        m_grilla2scm.SetRow(7);
        m_grilla2scm.SetCol(1);
        a5.Format("%01.2f",10/(m_vmscm*10/36));
        m_grilla2scm.SetText(a5);
        m_grilla2scm.SetRow(8);
        m_grilla2scm.SetCol(1);
        a5.Format("%01.2f",fd);
        m_grilla2scm.SetText(a5);
        m_grilla2scm.SetRow(5);
        m_grilla2scm.SetCol(1);
        a5.Format("%01.2f",y);
        m_grilla2scm.SetText(a5);
        m_grilla2scm.SetRow(6);
        m_grilla2scm.SetCol(1);
        a5.Format("%01.2f",x);
        m_grilla2scm.SetText(a5);}
    }
}
void scm::OnButton2()
{
    //mostrar y ocultar parámetros
    m_grilla1scm.ShowWindow(0);//mostrar grilla 1
    m_grilla2scm.ShowWindow(0);//mostrar grilla 2
    b1.SetWindowText("Parámetros de simulación");//cambiar de título
    b2.ShowWindow(1);
    b3.ShowWindow(1);
    b4.ShowWindow(1);
    b5.ShowWindow(1);
    b6.ShowWindow(1);
    b7.ShowWindow(1);
    b8.ShowWindow(1);
    c1.ShowWindow(1);
    c2.ShowWindow(1);
    c3.ShowWindow(1);
    c4.ShowWindow(1);
    c5.ShowWindow(1);
    c6.ShowWindow(1);
    c7.ShowWindow(1);
    d1.ShowWindow(1);
    d2.ShowWindow(0);
}
BOOL gat::OnInitDialog()
{
    CDialog::OnInitDialog();
```

```

// TODO: Add extra initialization here
CWinApp* pApp = AfxGetApp();
HICON hIcon;
//Poner ícono en boton zoom out
hIcon = pApp->LoadIcon(IDI_ICON2);
m_boton1.SetIcon(hIcon);
//Poner ícono en boton zoom out
hIcon = pApp->LoadIcon(IDI_ICON3);
m_boton2.SetIcon(hIcon);
w1=0;
double y[501][2];//
//double y1[2][101]
m_Chart.SetColumnCount(1);
m_Chart.SetRowCount(100);
UpdateData(0);
CString value,value1;
for(int i=0;i<500;i++)
    y[i][0]=0;
for(int x=0;x<100;x++)
{
    m_Chart.SetColumn(1);
    m_Chart.SetRow(x+1);
    for (int i=0;i<=100;i++)
        y[x][0]= y[x][0 ]+rtp[x][i];
    value.Format("%01.2f", (y[x][0]+0.5));
    m_Chart.SetData(value);
    value1.Format("%01.2f",tts*x/100);
    m_Chart.SetRowLabel(value1);//aquí se pone el tiempo en el gráfico
    m_Chart.Refresh();
}
m=y[1][0];
UpdateData(0);
return TRUE;
}
void gat::OnButton1()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here
    double y[501][2];//
    w1=w1+5;
    //double y1[2][101];
    m_Chart.SetColumnCount(1);
    m_Chart.SetRowCount(100+w1);
    CString value,value1;
    for(int i=0;i<500;i++)
        y[i][0]=0;
    for(int x=0;x<(100+w1);x++)
    {
        m_Chart.SetColumn(1);
        m_Chart.SetRow(x+1);
        for (int i=0;i<=100;i++)
            y[x][0]= y[x][0 ]+rtp[x][i];
        value.Format("%01.2f",y[x][0]+0.5);
        m_Chart.SetData(value);
        value1.Format("%01.2f",tts*x/100);
        m_Chart.SetRowLabel(value1);//aquí se pone el tiempo en el gráfico
        m_Chart.Refresh();
    }
}
}

```

```

void gat::OnButton2()
{
    double y[501][2];
    w1=w1-5;
    //double y1[2][101];
    m_Chart.SetColumnCount(1);
    m_Chart.SetRowCount(100+w1);
    CString value,value1;
    for(int i=0;i<500;i++)
        y[i][0]=0;
    for(int x=0;x<(100+w1);x++)
    {

        m_Chart.SetColumn(1);
        m_Chart.SetRow(x+1);
        for (int i=0;i<=100;i++)
            y[x][0]= y[x][0 ]+rtp[x][i];
        value.Format("%01.2F",y[x][0]+0.5);
        m_Chart.SetData(value);
        value1.Format("%01.2F",tts*x/100);
        m_Chart.SetRowLabel(value1);//aquí se pone el tiempo en el gráfico
        m_Chart.Refresh();
    }
}
}
BOOL gf::OnInitDialog()
{
    CDialog::OnInitDialog();
    CWinApp* pApp = AfxGetApp();
    HICON hIcon;
    //Poner ícono en boton zoom out
    hIcon = pApp->LoadIcon(IDI_ICON2);
    m_boton1.SetIcon(hIcon);
    //Poner ícono en boton zoom out
    hIcon = pApp->LoadIcon(IDI_ICON3);
    m_boton2.SetIcon(hIcon);
    w2=0;
    w1=1;
    double y[501][2];
    //double y1[2][101]
    m_Chart.SetColumnCount(1);
    m_Chart.SetRowCount(fase);
    CString value,value1,value2;
    for(int i=0;i<500;i++)
        y[i][0]=0;
    for(int x=0;x<fase;x++)
    {
        m_Chart.SetColumn(1);
        m_Chart.SetRow(x+1);
        y[x][0]=(1.5+fase/100)*w1;
        value.Format("%01.2F",y[x][0]);
        m_Chart.SetData(value);
        value1.Format("%01.2F",tts*x/fase);
        m_Chart.SetRowLabel(value1);//aquí se pone el tiempo en el gráfico
        m_Chart.Refresh();
        w1=-w1;
    }
    return TRUE; // return TRUE unless you set the focus to a control
                // EXCEPTION: OCX Property Pages should return FALSE
}

```

```

void gf::OnButton1()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here
    w1=1;
    w2=w2+5;
    double y[501][2];
    m_Chart.SetColumnCount(1);
    m_Chart.SetRowCount(fase+w2);
    CString value,value1,value2;
    for(int i=0;i<500;i++)
        y[i][0]=0;
    for(int x=0;x<(fase+w2);x++)
    {
        m_Chart.SetColumn(1);
        m_Chart.SetRow(x+1);
        y[x][0]=(1.5+fase/100)*w1;
        value.Format("%01.2F",y[x][0]);
        m_Chart.SetData(value);
        value1.Format("%01.2F",tts*x/fase);
        m_Chart.SetRowLabel(value1);//aquí se pone el tiempo en el gráfico
        m_Chart.Refresh();
        w1=-w1;
    }
}
void gf::OnButton2()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here
    w1=1;
    w2=w2-5;
    double y[501][2];//
    m_Chart.SetColumnCount(1);
    m_Chart.SetRowCount(fase+w2);
    CString value,value1,value2;
    for(int i=0;i<500;i++)
        y[i][0]=0;
    for(int x=0;x<(fase+w2);x++)
    {
        m_Chart.SetColumn(1);
        m_Chart.SetRow(x+1);
        y[x][0]=(1.5+fase/100)*w1;
        value.Format("%01.2F",y[x][0]);
        m_Chart.SetData(value);
        value1.Format("%01.2F",tts*x/fase);
        m_Chart.SetRowLabel(value1);//aquí se pone el tiempo en el gráfico
        m_Chart.Refresh();
        w1=-w1;
    }
}
}
BOOL gtvtf::OnInitDialog()
{
    CDialog::OnInitDialog();
    // TODO: Add extra initialization here
    CWinApp* pApp = AfxGetApp();
    HICON hIcon;
    //Poner ícono en boton zoom out
    hIcon = pApp->LoadIcon(IDI_ICON2);
    m_boton1.SetIcon(hIcon);
    //Poner ícono en boton zoom out
    hIcon = pApp->LoadIcon(IDI_ICON3);
}

```

```

m_boton2.SetIcon(hIcon);
w1=0;
double y[501][2];//
//double y1[2][101]
m_Chart.SetColumnCount(1);
m_Chart.SetRowCount(100);
UpdateData(0);
CString value,value1;
for(int i=0;i<500;i++)
    y[i][0]=0;
for(int x=0;x<100;x++)
{
    m_Chart.SetColumn(1);
    m_Chart.SetRow(x+1);
    for (int i=0;i<=100;i++)
        y[x][0]= y[x][0 ]+rtp[x][i];
    value.Format("%01.2F",(y[x][0]+0.5));
    m_Chart.SetData(value);
    value1.Format("%01.2F",tts*x/100);
    m_Chart.SetRowLabel(value1);//aquí se pone el tiempo en el gráfico
    m_Chart.Refresh();
}
m=y[1][0];
UpdateData(0);
return TRUE; // return TRUE unless you set the focus to a control
// EXCEPTION: OCX Property Pages should return FALSE
}
void gtvtf::OnButton1()
{
// TODO: Add your control notification handler code here
double y[501][2];//
w1=w1+5;
//double y1[2][101];
m_Chart.SetColumnCount(1);
m_Chart.SetRowCount(100+w1);
CString value,value1;
for(int i=0;i<500;i++)
    y[i][0]=0;
for(int x=0;x<(100+w1);x++)
{
    m_Chart.SetColumn(1);
    m_Chart.SetRow(x+1);
    for (int i=0;i<=100;i++)
        y[x][0]= y[x][0 ]+rtp[x][i];
    value.Format("%01.2F",y[x][0]+0.5);
    m_Chart.SetData(value);
    value1.Format("%01.2F",tts*x/100);
    m_Chart.SetRowLabel(value1);//aquí se pone el tiempo en el gráfico
    m_Chart.Refresh();
}
}
void tvtf::OnButton2()
{
// TODO: Add your control notification handler code here
double y[501][2];//
w1=w1-5;
//double y1[2][101];
m_Chart.SetColumnCount(1);

```

```

m_Chart.SetRowCount(100+w1);
CString value,value1;
for(int i=0;i<500;i++)
    y[i][0]=0;
for(int x=0;x<(100+w1);x++)
{
    m_Chart.SetColumn(1);
    m_Chart.SetRow(x+1);
    for (int i=0;i<=100;i++)
        y[x][0]= y[x][0 ]+rtp[x][i];
    value.Format("%01.2F",y[x][0]+0.5);
    m_Chart.SetData(value);
    value1.Format("%01.2F",tts*x/100);
    m_Chart.SetRowLabel(value1);//aquí se pone el tiempo en el gráfico
    m_Chart.Refresh();
}
}
}
BOOL mesr::OnInitDialog()
{
    CDialog::OnInitDialog();
    // TODO: Add extra initialization here
    double res[100];
    double y[501];//
    mxArray* In1;
    mxArray* Out;
    In1=mxCreateDoubleMatrix(1,100,mxREAL);
    m_Chart.SetColumnCount(1);
    m_Chart.SetRowCount(100);
    CString value,value1;
    for(int i=0;i<500;i++)
        y[i]=0;
    for(int x=0;x<100;x++)
    {
        for (int i=0;i<=100;i++)
            y[x][0]= y[x][0 ]+rtp[x][i];
    }
    m=y[50];
    UpdateData(0);
    memcpy(mxGetPr(In1),y,100*sizeof(double));
    Out=mlfMyfunc(In1);
    memcpy(res,mxGetPr(Out),100*sizeof(double));
    mxDestroyArray(Out);
    mxDestroyArray(In1);
    for(x=0;x<100;x++)
    {
        m_Chart.SetColumn(1);
        m_Chart.SetRow(x+1);
        value.Format("%01.2F",res[x]);
        m_Chart.SetData(value);
        value1.Format("%01.2F",freq*x/100);
        m_Chart.SetRowLabel(value1);
        m_Chart.Refresh();
    }
}
return TRUE; // return TRUE unless you set the focus to a control
// EXCEPTION: OCX Property Pages should return FALSE
}
}
BOOL prp::OnInitDialog()
{

```

```

CDialog::OnInitDialog();
// TODO: Add extra initialization here
double y[501];
m_Chart.SetColumnCount(1);
m_Chart.SetRowCount(dispersor+1);
CString value,value1;
for(int i=0;i<500;i++)
    y[i]=0;
for(int x=0;x<=dispersor;x++)
{
    m_Chart.SetColumn(1);
    m_Chart.SetRow(x+1);
    y[x]=potencia[x+1]/100;//potencia [dB]
    value.Format("%01.2f",y[x]);
    m_Chart.SetData(value);
    value1.Format("%01.2f",retardo[dispersor]/dispersor*x);
    m_Chart.SetRowLabel(value1);//retardo us
    m_Chart.Refresh();
}
m=potencia[50];
UpdateData(0);
return TRUE; // return TRUE unless you set the focus to a control
        // EXCEPTION: OCX Property Pages should return FALSE
}
BOOL lcr::OnInitDialog()
{
    CDialog::OnInitDialog();
// TODO: Add extra initialization here
double y[501];
double aux;
int ciclo=0;
m_Chart.SetColumnCount(1);
m_Chart.SetRowCount(dispersores+1);
CString value,value1;
while(ciclo <= dispersores)//método burbuja
{
    for(int k = 0; k<(dispersores-1); k++)
    {
        if(p[k] > p[k+1])
        {
            aux=p[k];
            p[k]=p[k+1];
            p[k+1]= aux;
        }
    }
    ciclo++;
}
for(int i=0;i<500;i++)
    y[i]=0;
for(int x=0;x<=dispersores;x++)
{
    m_Chart.SetColumn(1);
    m_Chart.SetRow(x+1);
    y[x]=fd*sqrt(2*3.1416)*pow(10,p[x]/20)*exp(pow(pow(10,p[x]/20),2))/100;//potencia [dB]
    value.Format("%01.2f",y[x]);
    m_Chart.SetData(value);
    value1.Format("%01.4f",pow(10,p[dispersores]/20)/dispersores*x);
    m_Chart.SetRowLabel(value1);//aquí se pone el tiempo en el gráfico
    m_Chart.Refresh();
}

```

```

    }
    m=p[1];
    UpdateData(0);
    return TRUE; // return TRUE unless you set the focus to a control
                // EXCEPTION: OCX Property Pages should return FALSE
}
BOOL adf::OnInitDialog()
{
    CDialog::OnInitDialog();
    // TODO: Add extra initialization here
    double y[501];
    double aux;
    int ciclo=0;
    m_Chart.SetColumnCount(1);
    m_Chart.SetRowCount(dispersores+1);
    CString value,value1;
    while(ciclo <= dispersores)
    {
        for(int k = 0; k<(dispersores-1); k++)
        {
            if(p[k] > p[k+1])
            {
                aux=p[k];
                p[k]=p[k+1];
                p[k+1]= aux;
            }
        }
        ciclo++;
    }
    for(int i=0;i<500;i++)
        y[i]=0;
        m_Chart.SetColumn(1);
        m_Chart.SetRow(1);
        y[0]=0;
        value.Format("%01.2f",y[0]);
        m_Chart.SetData(value);
        value1.Format("%01.4f",y[0]);
        m_Chart.SetRowLabel(value1);
    if(dispersores>5)
    {
        for(int x=1;x<(dispersores-5);x++)
        {
            m_Chart.SetColumn(1);
            m_Chart.SetRow(x+1);
            y[x]=((exp(pow(pow(10,p[x+1]/20),2))-1)/(sqrt(6.28)*fd*pow(10,p[x+1]/20)));
            value.Format("%01.2f",y[x]);
            m_Chart.SetData(value);
            value1.Format("%01.4f",pow(10,p[dispersores]/20)/dispersores*x);
            m_Chart.SetRowLabel(value1);
            m_Chart.Refresh();
        }
    }
    else
    {
        for(int x=1;x<dispersores;x++)
        {
            m_Chart.SetColumn(1);
            m_Chart.SetRow(x+1);
            y[x]=((exp(pow(pow(10,p[x+1]/20),2))-1)/(sqrt(6.28)*fd*pow(10,p[x+1]/20)));

```

```

        value.Format("%01.2f",y[x]);
        m_Chart.SetData(value);
        value1.Format("%01.4f",pow(10,p[dispersores]/20)/dispersores*x);
        m_Chart.SetRowLabel(value1);
        m_Chart.Refresh();
    }
}
m=y[25];
UpdateData(0);
return TRUE; // return TRUE unless you set the focus to a control
            // EXCEPTION: OCX Property Pages should return FALSE
}
BOOL srf::OnInitDialog()
{
    CDialog::OnInitDialog();
    // TODO: Add extra initialization here
    double y[501];
    double w1,w;
    int fdp;
    CString value,value1;
    fdp=fd;
    w=0;
    m_Chart.SetColumnCount(1);
    m_Chart.SetRowCount(fdp+1);
    for(int j=0;j<=dispersores;j++)
        w=w+pow(10,p[j]/20);
    w1=w*1000/dispersores;
    for(int i=0;i<500;i++)
        y[i]=0;
    for(int x=0;x<=fdp;x++)
    {
        m_Chart.SetColumn(1);
        m_Chart.SetRow(x+1);
        y[x]=w1/(fd*3.1416*sqrt(1-pow(x/fd,2)));
        value.Format("%01.2f",y[x]);
        m_Chart.SetData(value);
        value1.Format("%01.2f",x+fc);
        m_Chart.SetRowLabel(value1);
        m_Chart.Refresh();
    }
    m=y[0];
    UpdateData(0);//control programador
    return TRUE; // return TRUE unless you set the focus to a control
                // EXCEPTION: OCX Property Pages should return FALSE
}

```

El proyecto de grado, “Análisis y desarrollo de un software de modelos y simulación de una canal móvil para las bandas de 850 MHz. y 1900 MHz.”, fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa desde:

Sangolquí,

Ing. Gonzalo Olmedo M.Sc.

Coordinador de la Carrera de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.

Dr. Jorge Carvajal

Secretario Académico

Christian Omar Cevallos Tipán.

Autor