



DESARROLLO DEL MODELO DE PROPAGACIÓN ANDINO UIS®

YAIR IVAN CARREÑO LIZARAZO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2005

DESARROLLO DEL MODELO DE PROPAGACIÓN ANDINO UIS®

YAIR IVAN CARREÑO LIZARAZO

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al
título de Ingeniero Electrónico**

Director

ALEXIS PAOLO GARCÍA ARIZA
Ph.D (c) Ingeniero Electrónico

Co-directores

HOMERO ORTEGA BOADA
Ph.D Ciencias de la Ingeniería

ANTONIO JAIMES OVIEDO
Ing. Ministerio de comunicaciones de Colombia
Seccional territorial de Bucaramanga

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2005

Este logro es dedicado a mis cinco razones:

Mi mamá Gloria Carreño Lizarazo.

Mi hermanita Judy Andrea Oquendo Carreño.

Mi hermanito Alejandro Vecino Carreño.

Mi hermanito Gerardo Vecino Carreño.

Mi sobrinito Johan Steven Cipagauta Oquendo.

YAIR IVAN CARREÑO LIZARAZO.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	4
2. MODELOS DE PROPAGACION EN LOS SISTEMAS DE ACCESO INALAMBRICOS	6
2.1 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALAMBRICA	6
2.2 APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS INALAMBRICOS	7
2.3 EVOLUCIÓN DE LAS COMUNICACIONES INALAMBRICAS	9
2.3.1 GENERACIONES	11
2.3.1.1 Primera Generación	11
2.3.1.2 Segunda Generación	11
2.3.1.3 Tercera Generación	12
2.3.2 EVOLUCION DE GSM A 3G	13
2.4 SISTEMAS DE COMUNICACION MOVIL	14
2.4.1 Cobertura y movilidad	15
2.4.2 Capacidad	16
2.4.3 Reutilización de frecuencias	17
2.4.4 Señalización	17
2.4.5 Handover o traspaso	18
2.5 ESTRUCTRA DE UNA RED DE TELEFONIA MÓVIL CELULAR	18
2.6 ESQUEMAS DE ACCESO AL MEDIO	21
2.6.1 Métodos de Duplexación	21
2.6.1.1 Duplexación por división de frecuencia	21
2.6.1.2 Duplexación por división de tiempo	22
2.6.2 Métodos de acceso al canal	22
2.6.2.1 Acceso múltiple por división de tiempo	22
2.6.2.2 Acceso múltiple por división de frecuencia	23

2.6.2.3 Acceso múltiple por división de código	24
2.6.2.4 Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales	24
	43
3. ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS DE PROPAGACION	25
3.1 PROPAGACION MULTITRAYECTORIA	26
3.1.1 Caracterización de la propagación	34
3.2 MODELADO ESTADISTICO O EMPIRICO	35
3.2.1 Modelo path loss	35
3.2.1.1 Modelos semi-empiricos para microceldas urbanas	35
3.2.1.2 Modelos path loss para entornos indoors	36
3.2.2 Desvanecimiento a gran escala	38
3.2.2.1 Modelamiento en banda angosta	38
3.2.2.2 Modelamiento en banda ancha	38
3.2.3 Desvanecimiento a pequeña escala	39
3.2.3.1 Modelamiento en banda angosta	39
3.2.3.2 Modelamiento en banda ancha	42
3.3 MODELADO DETERMINISTICO	62
3.3.1 Modelo de los fenómenos de propagación y sus efectos	62
3.3.1.1 Ecuaciones integrales	66
3.3.1.2 Ecuaciones diferenciales	73
3.3.2 Métodos asintóticos	74
3.4 MODELADO SEMIDETERMINISTICO	81
4. DIFRACCION POR FILOS Y ESQUINAS	91
4.1 NATURALEZA LOCAL DE LA PROPAGACION	91
4.1.1 Evaluación de la distorsión de campos	91
4.1.2 Interpretación de la región local en términos de las zonas de Fresnel	92
4.2 DIFRACCION DE UNA ONDA PLANA DEBIDO A MEDIA PANTALLA ABSORBENTE	93
4.2.1 Campo en la región iluminada $y > 0$	103

4.2.2 Campo en la región sombra $y < 0$	104
4.2.3 Teoría Geométrica de la Difracción (GTD)	105
4.2.4 Evaluando la integral de Fresnel en la región frontera	106
4.2.5 Teoría Uniforme de la Difracción (UTD)	108
4.3 DIFRACCION EN OTROS ELEMENTOS	109
4.3.1 Pantalla absorbente	111
5. MODELO DE PROPAGACION ANDINO UIS®	69
5.1 CARACTERISTICAS DEL MODELO DE PROPAGACION COST231-WALFISCH-IKEGAMI	70
5.2 ESTUDIOS DE DIFRACCION EN CONVERGENCIAS DE VIAS	74
5.2.1 Difracción en esquinas	75
5.2.2 Difracción en convergencias de vías	88
5.3 DIFRACCION SOBRE OBSTACULOS EN TERRENO IRREGULAR	95
5.3.1 Difracción por filos de cuchillos	95
5.3.2 Difracción por cilindros	96
5.3.3 Consideraciones planteadas por el modelo Andino UIS sobre la propagación en terreno irregular	97
5.4 FORMULACION DEL MODELO ANDINO UIS	99
6. HERRAMIENTAS DE PLANIFICACION	102
6.1 GENERALIDADES SOBRE SOFTWARE DE SIMULACION	103
6.1.1 Sistemas de información geográfica	103
6.1.2 Cartografía digital para telecomunicaciones	104
6.1.2.1 Modelos digitales de terreno (DTM)	104
6.1.2.2 Modelos digitales de ciudad (DCM)	108
6.1.2.3 Clutters	110
6.1.3 Procesos involucrados en una simulación	112
6.1.4 Georeferenciación y proyección de coordenadas geográficas	115
6.1.4.1 Proyecciones cartográficas	115
6.1.4.2 Sistemas de coordenadas	117

6.1.4.3 Algunos sistemas de proyección	118
6.2 HERRAMIENTA DE PLANIFICACION CELLVIEW DE ARVIEW 3.1	120
6.3 HERRAMIENTA DE PLANIFICACION ICS-Telecom DE ATDI	121
6.3.1 Descripción general	121
6.3.2 Funcionalidades generales	122
6.4 ADATACION DEL MODELO DE PROPAGACION ANDINO UIS A LA APLICACIÓN CELLVIEW	130
6.4.1 Adición del mapa digital Bucaramanga_Metropolitana	130
6.4.2 Habilitación del modelo propuesto Andino UIS dentro de la aplicación Cellview	131
6.4.3 Georeferenciación de lo archivos de datos	133
6.4.4 Adaptación de las nuevas antenas sectorizadas	137
6.5 DISEÑO DEL ALGORITMO	141
6.5.1 Identificación de vías y convergencias	141
6.5.2 Determinación del perfil	144
7. VALIDACION DEL MODELO PROPUESTO ANDINO UIS MEDIANTE CAMPAÑAS DE MEDIDAS	146
7.1 EQUIPO DE MEDICION	147
7.1.1 La base estación (BS)	147
7.1.2 El analizador de RF (MS)	147
7.1.3 El software de adquisición	148
7.2 DETERMINACION DE LAS ZONAS PARA LA TOMA DE MEDIDAS	150
7.2.1 Barrio Bucaramanga	150
7.2.2 Barrio Provenza	151
7.2.3 Barrio San Luís	151
7.3 MEDICIONES EN CONVERGENCIAS DE VIAS	152
7.3.1 Mediciones en convergencias de vías del barrio Provenza	153
7.3.2 Mediciones en convergencias de vías del barrio Diamante II	154
7.4 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	154
7.5 ANALISIS DE LOS RESULTADOS	156

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	161
8.1 CONCLUSIONES	161
8.1.1 Sobre la difracción en convergencia de vías	162
8.1.2 Sobre la teoría de difracción por cilindros	162
8.1.3 Sobre el patrón de radiación de las antenas y la tecnología	163
8.1.4 Sobre un nuevo esquema de predicción	163
8.1.5 Sobre la implementación del modelo planteado	164
8.1.6 Sobre los resultados	165
8.1.7 Sobre los alcances y logros	165
8.2 RECOMENDACIONES	166
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	167
ANEXOS	

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 2.1. Un sistema inalámbrico en su concepto más básico.	7
Ilustración 2.2. Elementos de la arquitectura de un sistema de comunicación móvil.	19
Ilustración 2.3. Duplexación por división de frecuencia.	21
Ilustración 2.4. Duplexación por división de tiempo.	21
Ilustración 2.5. Sistema TDMA	22
Ilustración 2.6. Sistema FDMA.	23
Ilustración 2.7. Sistema CDMA.	24
Ilustración 3.1. Fenómeno Multipath	26
Ilustración 3.2. Representación de los mecanismos de reflexión, Scattering, Difracción, Transmisión y penetración dentro de edificios.	27
Ilustración 3.3. Señal recibida en un instante.	29
Ilustración 3.4. Señal recibida en diferentes instantes de tiempo.	30
Ilustración 3.5. Receptor en movimiento relativo.	32
Ilustración 3.6. Receptor y elementos interferentes en movimiento.	33
Ilustración 4.1. El campo que llega al punto receptor...	48
Ilustración 4.2. El agujero circular...	49
Ilustración 4.3. La zona de Fresnel.	53
Ilustración 4.4. Ejemplo de cálculo de perfil.	55
Ilustración 4.5 Cálculo de la 1 ^{ra} y 2 ^{da} zona de Fresnel de un perfil.	55
Ilustración 4.6. El campo transmitido a través de media pantalla absorbente.	54
Ilustración 4.7. Variación de la parte real de la integral...	57
Ilustración 4.8 Onda plana transmitida a través de media pantalla Absorbente.	59
Ilustración 4.9. Variación de la parte real ...	60
Ilustración 4.10. Variación del campo total con respecto a la ubicación del receptor en el eje y.	65

Ilustración 4.11. Zonas de transición.	66
Ilustración 4.12. Ondas planas incidentes y reflejadas sobre una pantalla.	66
Ilustración 4.13. Variación del coeficiente de difracción con respecto al ángulo de incidencia de la señal.	68
Ilustración 5.1. Parámetros del modelo. Geometría en terreno plano.	70
Ilustración 5.2. Definición del ángulo de orientación de la vía.	71
Ilustración 5.3. Geometría básica de la difracción en esquinas	75
Ilustración 5.4. Campo difractado Vs Frecuencia	81
Ilustración 5.5. Campo difractado Vs Frecuencia	82
Ilustración 5.6. Campo difractado Vs Distancia s1.	82
Ilustración 5.7. Campo difractado Vs Distancia s1.	83
Ilustración 5.8. Campo difractado Vs Distancia s2.	84
Ilustración 5.9. Campo difractado Vs Distancia s2.	84
Ilustración 5.10. Campo difractado Vs Distancia s2.	85
Ilustración 5.11. Campo difractado Vs Φ .	86
Ilustración 5.12. Campo difractado Vs Φ .	86
Ilustración 5.13. Campo difractado Vs Φ .	87
Ilustración 5.14. Campo difractado Vs Φ .	87
Ilustración 5.15. Geometría básica de una convergencia de vía.	88
Ilustración 5.16. Área de una convergencia	89
Ilustración 5.17. Campo difractado Vs Φ .	90
Ilustración 5.18. Magnitud de campo difractado Vs Ψ y S.	93
Ilustración 5.19. Magnitud de campo difractado Vs Ψ .	94
Ilustración 5.20. Magnitud de campo difractado Vs S.	94
Ilustración 5.21. Esquema básico del método de difracción por filos de cuchillo.	95
Ilustración 5.22. Esquema básico del método difracción por cilindros.	96
Ilustración 5.23. Son obstáculos aquellos elementos que interfieren...	98
Ilustración 6.1. Simulación desde el cerro Suba (Bogotá).	104
Ilustración 6.2. Mapa digital de terreno.	105
Ilustración 6.3. Muestra de una plancha análoga.	105
Ilustración 6.4. Digitalización de información análoga.	106

Ilustración 6.5. Digitalización de información análoga.	106
Ilustración 6.6. Simulación final del terreno.	107
Ilustración 6.7. Terreno cargado en ICS-Telecom.	107
Ilustración 6.8. Detalle de ciudad de Bogotá.	108
Ilustración 6.9. Detalle ciudad de Bogotá.	109
Ilustración 6.10 Muestra en 3D de Bogotá.	110
Ilustración 6.11 Ejemplo clusters de Cundinamarca.	111
Ilustración 6.12 Muestra de vectores y texto en el eje cafetero.	112
Ilustración 6.13 Proyecciones cónicas.	115
Ilustración 6.14 Proyección Normal.	116
Ilustración 6.15 Proyección Transversal.	116
Ilustración 6.16 Proyección Oblicua.	116
Ilustración 6.17 Marcador Transversal Universal.	118
Ilustración 6.18. Cobertura tridimensional.	125
Ilustración 6.19. Visualización de un análisis de interferencia.	125
Ilustración 6.20. Ejemplo de repartición de retardos simulcast.	126
Ilustración 6.21. Ejemplo de mejor servidor.	127
Ilustración 6.22. Análisis de perfiles.	127
Ilustración 6.23. Ejemplo de un diseño de antena.	128
Ilustración 6.24. Base de datos de emplazamientos de alta capacidad.	128
Ilustración 6.25. Base de datos multimedia por emplazamiento.	129
Ilustración 6.26. Mapa digital Bucaramanga_Metropolitana.	130
Ilustración 6.27. Aplicación del modelo Andino UIS.	132
Ilustración 6.28 Contorno de la ciudad Bucaramanga (contorno.shp).	134
Ilustración 6.29. Contorno de la ciudad Bucaramanga y grid de alturas (contorno.shp y Gridh).	136
Ilustración 6.30. Contorno de la ciudad Bucaramanga e Hillshade.	136
Ilustración 6.31 Patrón de radiación de la antena ASPD977.	137
Ilustración 6.32 Patrón de Radiación de la antena 855DDH90E.	138
Ilustración 6.33 Patrón de radiación de la antena D8874G90R.	139
Ilustración 6.34 Datos del Cellview®.	141
Ilustración 6.35 Sondeo alrededor de un punto.	142
Ilustración 6.36 Dimensiones del marco de referencia.	143

Ilustración 6.37 Identificación de vías y convergencias.	144
Ilustración 6.38 Perfil de obstáculos.	145
Ilustración 6.39 Perfil de alturas de los obstáculos.	145
Ilustración 6.40 Perfil de alturas de los obstáculos.	145
Ilustración 7.1 Radio base Provenza	147
Ilustración 7.2 Equipo de monitoreo Miniport Receiver EB200	148
Ilustración 7.3 Software para el manejo de datos del equipo de Monitoreo Miniport Receiver EB2000	149
Ilustración 7.4 Mediciones barrio Bucaramanga	150
Ilustración 7.5 Mediciones barrio Provenza	151
Ilustración 7.6 Mediciones barrio San Luís	152
Ilustración 7.7 Ejemplo de convergencia de vías en un entorno semi- urbano.	152
Ilustración 7.8 Convergencias barrio Provenza	153
Ilustración 7.9 Convergencias barrio Diamante II.	154
Ilustración 7.10 Simulación de cobertura para sistema TDMA/IS-136.	155
Ilustración 7.11 Simulación de cobertura para el sistema CDMA.	155
Ilustración 7.12 Puntos de medición para el sistema TDMA.	156
Ilustración 7.13 Puntos de medición para el sistema CDMA	157
Ilustración 7.14 Puntos de medición en convergencia de vías	165

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 6.1 Scripts de Arcview® creados y modificados.	133
Tabla 6.2 Parámetros coordenadas planas rurales Bogotá.	133
Tabla 6.3 Parámetros coordenadas planas rurales Bucaramanga.	133
Tabla 6.4 Parámetros coordenadas planas para re-georeferenciar el mapa Bucara.	135
Tabla 6.5 Parámetros del transmisor con las antenas 855DDH90E.	140
Tabla 6.6 Parámetros del transmisor . con las antenas D8874G90R .	140
Tabla 7.1 Bucaramanga TDMA	157
Tabla 7.2 Bucaramanga CDMA	158
Tabla 7.3 Provenza TDMA	158
Tabla 7.4 Provenza CDMA	158
Tabla 7.5 San Luís TDMA	159
Tabla 7.6 San Luís CDMA	159
Tabla 7.7 Convergencias en Provenza y Diamante II	159

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. SCRIPTS DE ARCVIEW MODIFICADOS ESTADÍSTICAS POR RUTA SEGÚN EL BARRIO	171
ANEXO B. RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE MEDIDA Y SIMULACIONES	192
ANEXO C. CODIGOS DEL ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN ANDINO UIS®	203
ANEXO D. RECOMMENDATION ITU-R P.526-8	182
ANEXO E. MEDICIONES EN CONVERGENCIAS.	

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Partiendo de los avances en el área de predicción de la Radio Propagación, con base en el modelado matemático, simulación y campañas de medidas, desarrollar un modelo mejorado de propagación para determinar las pérdidas de potencia de un sistema de acceso inalámbrico UHF ubicado en un entorno con características urbanas irregulares y topografía Andina.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar un estudio de los avances en la predicción de pérdidas por propagación bajo condiciones urbanas irregulares.
- Estudiar la herramienta de planificación Cellview[®] para adaptarle el modelo de propagación a desarrollar.
- Formular el modelo semideterminístico de propagación AndinoUIS[®] con base al desarrollo alcanzado al interior de RadioGIS con el modelo COST231-Walfisch-Ikegami y las nuevas consideraciones sobre convergencia de vías y pérdidas por terreno irregular siguiendo los lineamientos de la ITU-R P.526-8.
- Implementar el algoritmo del Modelo de Propagación AndinoUIS[®] dentro de la Herramienta de Planificación Cellview[®].
- Diseñar y realizar campañas de medidas, sobre sectores previamente seleccionados en la ciudad de Bucaramanga, mediante la utilización de unidades de monitoreo espectral, para obtener puntos de validación de los resultados de simulación y datos útiles para el ajuste del modelo AndinoUIS[®].

- Simular la cobertura celular de una Radio Base, en zonas particulares de la ciudad de Bucaramanga, mediante la Herramienta de Planificación Cellview[®] y utilizando el Modelo propuesto.
- Llevar a cabo el análisis de resultados y los ajustes que sean necesarios al algoritmo del Modelo propuesto haciendo uso de los resultados de trabajos anteriores, de las campañas de medidas y de simulaciones obtenidas con la investigación.

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DEL MODELO DE PROPAGACION ANDINO UIS®

AUTOR: YAIR IVAN CARREÑO LIZARAZO.

PALABRAS CLAVES: Modelos de Propagación, Herramientas de planificación, Difracción, Esquinas, Convergencia, Relieve.

DESCRIPCIÓN: Paralelo al desarrollo de los sistemas de acceso inalámbricos, surge la necesidad de adaptar las herramientas de predicción existentes a las adicionales exigencias de los sistemas actuales y de los entornos complejos.

Los estudios recientes sobre los modelos de propagación han arrojado avances en la manera de considerar los fenómenos de difracción en entornos tan complejos como los de la región Andina. Siendo estos bien implementados en algoritmos de apoyo generan niveles de predicción de mayor efectividad para la evaluación de los sistemas inalámbricos de comunicación que estén establecidos o se establezcan sobre una determinada región, haciendo uso de software comercial e ingeniería de RF local.

Este artículo trata el estudio planteado para el complemento, desarrollo e implementación de un modelo determinístico de propagación para la predicción de pérdidas de la señal electromagnética en un sistema de red de acceso inalámbrico a nivel de entornos *Outdoor* y la implementación de su respectivo algoritmo en un lenguaje flexible y capaz de adaptarse a un SIG (Sistema de Información Geográfica). Este modelo se diseña bajo consideraciones de un sistema sectorizado de tecnología inalámbrica móvil sobre un entorno tipo Andino para la banda UHF, haciendo uso de los avances logrados por el Grupo de Investigación en Radiocomunicaciones - RadioGIS-UIS - en el campo de predicción de pérdidas con el modelo COST231-Walfisch-Ikegami, recomendaciones internacionales de la ITU y validación por medio de campañas de mediciones en la ciudad de Bucaramanga (Colombia) en una

región de topografía irregular, con construcciones no homogéneas y bajo convergencia de calles.

El presente estudio se ha desarrollado con base a la experiencia acumulada en el Grupo de Investigación en Radiocomunicaciones - RadioGIS - de la Universidad Industrial de Santander con el apoyo de Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones - E3T -, el Ministerio de Comunicaciones de Colombia y la compañía TES América Andina Ltda.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las ondas electromagnéticas comienza en 1864 cuando James Clark Maxwell formuló la teoría electromagnética de la luz que lo llevó a pensar en la existencia de ondas que no podrían captar nuestros sentidos. El impacto de esos estudios ha sido tal que ha marcado los grandes cambios del siglo XX y está conduciendo a la humanidad hacia un mundo globalizado. Hoy podemos afirmar que el futuro de las comunicaciones es inalámbrico. Para lograr ese propósito, se han realizado grandes esfuerzos para comprender los diferentes fenómenos involucrados en la propagación de las ondas radioeléctricas, se inicio la búsqueda de procedimientos y herramientas que permitieran predecir su propagación a diferentes frecuencias, teniendo en cuenta los diversos parámetros involucrados en la transmisión tales como el patrón de radiación de las antenas, la altura de las antenas con respecto al piso y el entorno topográfico y climático de las zonas de interés.

Al inicio de las transmisiones de Radio y posteriormente de Televisión, siempre se consideró importante definir la zona de servicio en donde la señal se podría transmitir con calidad, así como las zonas de servicio donde el nivel de la señal ya no es suficiente para lograr una comunicación de calidad pero todavía es lo suficientemente elevado para causar interferencia a un sistema con la misma frecuencia. Estos hechos demandaron la definición de procedimientos y métodos que permitieran estimar la cobertura de dichas zonas¹.

Al modelar la propagación, se puede observar que las pérdidas en espacio libre pueden obtenerse de una fórmula que está en función de la distancia y la frecuencia. Las cosas se complican cuando no existe un escenario de espacio libre sino con obstáculos hechos por el Hombre (Edificios, puentes, etc.) o propios de la topografía de la región. En estos casos se empiezan a observar

¹ Daniel Rosas Tapia. Curso: Gestión de las Telecomunicaciones Inalámbricas. Unión Internacional de Telecomunicaciones – UIT, Centro de excelencia para la región Américas, 14 de Junio al 9 de Julio de 2004.

pérdidas por difracción y las ecuaciones de Maxwell que se aplican para este tipo de situaciones requieren la definición de parámetros adicionales como la permitividad o la permeabilidad de los obstáculos.

¿Cómo tener en cuenta tantos factores que influyen en la propagación?. Una solución se alcanzó a partir de la *experimentación práctica* y el análisis de la información procedente de *medidas de campo*. Dado un entorno topográfico, a una frecuencia determinada con una altura y antena definidas se procedió a medir la intensidad de campo eléctrico en forma radial en diferentes puntos, se procuraron diferentes tipos de escenarios topográficos y diferentes alturas. Así, a partir de un número importante de mediciones con variables controladas se obtuvo una serie de ecuaciones conocidas hoy como modelos estadísticos.

A medida que los sistemas de acceso inalámbricos se desarrollaron, también lo hicieron los modelos de predicción pasándose así de *modelos estadísticos* a *modelos semiderterminísticos* y *determinísticos*, esto es, modelos que además de considerar los resultados obtenidos de las campañas de mediciones también eran fundamentados por *aportes teóricos* hechos en el campo de la *física óptica*. En la actualidad este proceso ha continuado y con el desarrollo de nuevas tecnologías era más que obvia la necesidad de adaptar las herramientas de predicción existentes a las adicionales exigencias de los sistemas actuales y los entornos complejos².

Uno de los puntos claves en el diseño de redes de acceso inalámbrico tiene que ver con la evaluación de su desempeño mediante la aplicación de herramientas de software. El hecho de contar con una herramienta desarrollada para un entorno propio y de modelos de propagación ajustados a dichas características, que permitan examinar el desempeño de los sistemas de comunicación móviles ubicados en el territorio nacional no sólo beneficiará a los operadores brindándoles un análisis útil para la reducción de costos y mejoramiento de la calidad del servicio, sino que además permitirá que se

² Smulders, M. Jevrosimovic, M. Revén, S. Savov and E. Martijn of (TU/e). *State of the art channel models*.

lleven a cabo controles del impacto de dichos sistemas sobre el medio ambiente, es decir, una propagación racional de señales electromagnéticas tema que el Ministerio de Comunicaciones de Colombia ha planteado recientemente con el objetivo de establecer parámetros de prevención de riesgos, por la exposición de los habitantes a emisiones electromagnéticas por parte de los operadores³.

Hoy en día los entes investigadores como RadioGIS-UIS y CPS (Conectividad y Procesado de Señal) de la Universidad Industrial de Santander, no solo llevan a cabo estudios de predicción de pérdidas en espacios *Outdoor* (exteriores), sino también a espacios *Indoor* (interiores)⁴. En torno al área de radio propagación se han desarrollado varios proyectos de investigación que más adelante serán mencionados y que a partir de los cuales ha surgido el planteamiento de una serie de mejoras a los modelos de propagación aplicados a la región Andina.

En el presente estudio se ha planteado el complemento, desarrollo e implementación de un modelo semideterminístico de propagación para la simulación de pérdidas de la señal electromagnética en un sistema de red de acceso inalámbrico a nivel de entornos *Outdoor* y la implementación de su respectivo algoritmo en un lenguaje flexible y capaz de adaptarse a una herramienta de planificación móvil basada en SIG (Sistemas de Información Geográfica). Este modelo se diseña bajo consideraciones de un sistema sectorizado de tecnología inalámbrica móvil sobre un entorno tipo Andino para la banda UHF, haciendo uso de los avances logrados por el Grupo de Investigación en Radiocomunicaciones - RadioGIS-UIS - en el campo de

³ MINISTERIO DE COMUNICACIONES DE COLOMBIA. DECRETO NÚMERO 195 DE 2005: Por la cual se adoptan límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos, se adecuan procedimientos para la instalación de estaciones radioeléctricas y se dictan otras disposiciones.

⁴ José Talero y Everaldo Castellanos. Análisis de propagación electromagnética en ambientes cerrados. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2004.

predicción de pérdidas con el modelo COST231-Walfisch-Ikegami⁵, recomendaciones internacionales de la ITU⁶ y validación por medio de campañas de medidas en la ciudad de Bucaramanga (Colombia) en una región de topografía irregular, con construcciones no homogéneas y bajo convergencia de calles.

1.1 DESCRIPCION DEL CONTENIDO

Aunque el tema que se presenta en el capítulo 2 posee amplias fuentes de referencia, es imprescindible para aquel lector que se inicia en el tema de los sistemas de comunicación inalámbrica enfocarse en la comunicación móvil y más específicamente en la capa física. Si se posee un conocimiento básico de las tecnologías y los sistemas de comunicación inalámbrica, el lector puede omitir dicho capítulo.

Para comprender como se logra el desarrollo de un modelo de propagación, es necesario conocer como mínimo, los fenómenos físicos ligados a la radiopropagación y los métodos determinísticos, empíricos y estadísticos empleados para describir los mecanismos de propagación de las señales a través de los canales de transmisión, por ello en el capítulo 3 se presenta el estado del arte de los modelos de propagación y los parámetros que los modelos actuales han tenido en cuenta en su desarrollo.

En el capítulo 4 se presenta la base teórica de la formulación de la Teoría Geométrica de la Difracción (GTD, Geometrical Theory Diffraction), la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD, Uniform Theory Diffraction) y la aplicación de éstas a la radio propagación. El objetivo de éste capítulo es brindarle al lector un conocimiento básico sobre la manera en que la física óptica describe los fenómenos implicados en la radio propagación, para luego presentar el tratamiento que se le da a la formulación UTD en la determinación del

⁵ Alexis Paolo García Ariza, "COBERTURA PARA SISTEMAS MÓVILES CELULARES EN ENTORNO URBANO ESCARPADO. Universidad Industrial de Santander, E3T, Bucaramanga-Colombia, 2002.

⁶ Recommendation ITU-R P.526-8 "Propagation by diffraction".

comportamiento de las señales a lo largo de las vías y convergencias.

En el capítulo 5 se presenta el desarrollo del modelo de propagación Andino UIS®. Contiene básicamente el procedimiento llevado a cabo para describir el comportamiento de las señales en las convergencias de vías y él cómo establecer un parámetro que permitiera realizar un nivel de predicción aceptable en dichas áreas para luego combinarlo con los desarrollos de investigaciones anteriores⁷.

Como el objetivo de la investigación no se restringía únicamente a formular un modelo adaptado al entorno, si no además validar su nivel de predicción, era indispensable adaptarlo a una herramienta de planificación a través de la cual se pudieran realizar simulaciones para luego ser comparadas con datos obtenidos de mediciones empíricas. En el capítulo 6 se presenta la adaptación del modelo digital de ciudad⁸ de la zona metropolitana de Bucaramanga a la herramienta de planificación, la conversión de la formulación del modelo a un código de programación y su adaptación a la misma herramienta de planificación (i.e. Cellview® desarrollado por el grupo de comunicaciones Móviles de la Universidad Politécnica de Valencia⁹), la cual fue elegida debido a la experiencia que se tiene en su manejo y las facilidades ofrecidas por el MGC para su utilización.

Las mediciones empíricas realizadas y utilizadas en la validación del modelo propuesto y el protocolo de medición se describen en el capítulo 7. Allí se

⁷ Alexis Paolo García Ariza, "COBERTURA PARA SISTEMAS MÓVILES CELULARES EN ENTORNO URBANO ESCARPADO: Estudio del Modelo de Propagación Walfisch-Ikegami y su Desempeño en la Banda TDMA Colombiana en Presencia de Relieve, Mediante la Utilización de una Herramienta de Planificación Celular Basada en GIS⁷", Universidad Industrial de Santander, E3T, Bucaramanga-Colombia, 2002.

⁸ Mapa digital de Ciudad de Bucaramanga. Propiedad de TESAMERICA ANDINA Ltda., Bogotá Colombia.

⁹ ArcView 3D Analyst: 3D Surface Creation, Visualization, and Analysis: *Environmental Systems Research Institute, Inc.*, U.S, 1997. ArcView Spatial Analyst: Advanced Spatial Analysis Using Raster and Vector Data: *Environmental Systems Research Institute, Inc.*, U.S, 1996.

comenta el procedimiento de medición, las herramientas utilizadas y los sectores de análisis escogidos.

Finalmente se presentan los resultados y conclusiones de la investigación, la bibliografía utilizada en su desarrollo y los anexos complemento de la documentación.

CAPITULO 2

MODELOS DE PROPAGACIÓN EN LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN DE ACCESO INALÁMBRICO.

En la actualidad existe una gran variedad de fuente de información sobre el tema del presente capítulo, no obstante, para poder comprender los parámetros que implican el análisis y desarrollo de un modelo de propagación, es necesario presentar algunas características de los sistemas de comunicación inalámbrica diseñados para brindar servicio a receptores móviles. Dichas características se presentan en éste capítulo de una manera breve con el fin de dar una introducción al tema desarrollado en la presente investigación.

2.1 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

El objetivo de todo sistema de comunicación es proporcionar un medio seguro entre transmisor y receptor para intercambiar información, cuando el medio es no-guiado como la interfaz aire se hace referencia a un sistema de comunicación inalámbrica cuyo nivel de calidad en la comunicación está ligado precisamente a las características del medio. Cuando el receptor es una entidad móvil se crea el concepto de comunicaciones móviles. La introducción de los sistemas de comunicación móvil ha marcado una pauta importante en el desarrollo de las tecnologías de las Telecomunicaciones. Al comienzo el uso comercial del espectro de radio era asignado para sistemas broadcast de radio, televisión y bandas ciudadanas cuyo objetivo primordial era brindar un área de cobertura en la cual la potencia recibida por parte de los receptores fuese lo suficientemente mayor comparada con el ruido de fondo asegurando así, un enlace de comunicación de calidad aceptable; para este propósito se localizaban antenas transmisoras (Radio bases) sobre los tejados de las construcciones o edificios y radiando a una máxima potencia. El diseño de los sistemas broadcast era soportado por estudios experimentales y teóricos sobre el campo de radio propagación considerando largas distancias esto es, áreas

con un radio de 100 Km o más y teniendo en cuenta efectos producidos por la curvatura de la tierra, refracción en la atmósfera, o variación del terreno a gran escala ¹⁰.

En contraste a este tipo de sistemas, los sistemas de comunicación móvil contaban con el hecho de brindar cobertura a receptores móviles (abonados) en un área más reducida (aproximadamente 1Km), esto implicaba diseñar enlaces cortos de comunicación en un entorno generalmente metropolitano produciéndose así un desvanecimiento rápido de la señal (*fast fading*), esto exigía aplicar técnicas como rehuso de frecuencias para brindar cobertura a un área extensa obligando así que los diseños de este tipo de sistemas fuesen más complicados considerando por ejemplo que ahora no se pensaba únicamente en transmitir a una potencia adecuada si no también en los efectos de problemas adicionales como la interferencia debido al rehuso de frecuencia.

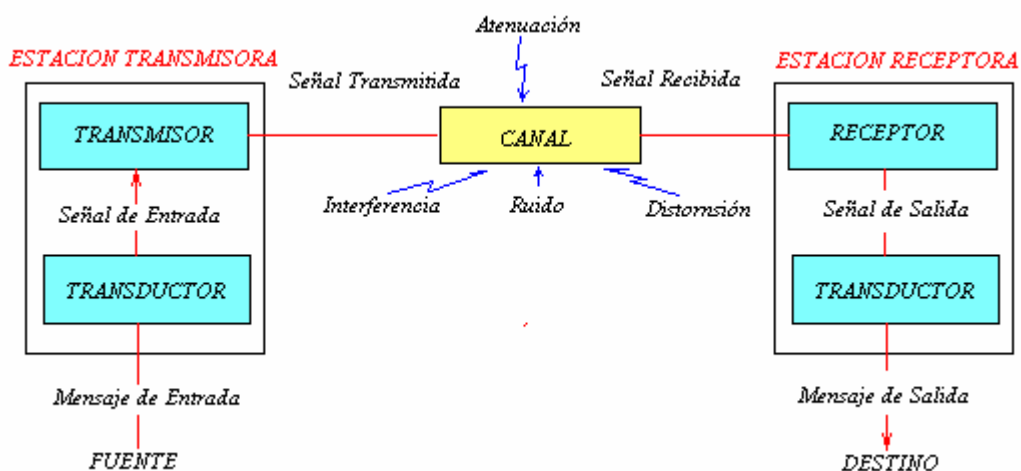


Ilustración 2. 1 Un sistema inalámbrico en su concepto más básico.

2.2 APLICACIONES DE LOS SISTEMAS INALÁMBRICOS

Se menciona a continuación las aplicaciones básicas de los sistemas de comunicación inalámbrica.

¹⁰ Henry L. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, USA: Prentice Hall PTR, 2000.

Sistemas Broadcast: Para transmisión de Radio y Televisión.

- **Microondas:** Para redes de transporte, enlaces de último kilómetro y larga distancia. Algunas características son:
 - Bandas Licenciadas: 4, 5, 6, 7, 8, 10, 13, 15, 18, 23, 38 GHz.
 - Diámetro típico de Antenas Parabólicas: 0.6, 0.8, 1.2, 1.8, 2.4, 3.7 metros.
 - Capacidades: nx64, E1/T1, E3/T3, STM0, Bridges etc.
- **Comunicaciones satelitales SFS (Servicio fijo por satélite)**

Son muy utilizadas en entornos rurales de difícil acceso, utilizan conexión independiente de la distancia entre los puntos a conectar (que se encuentren dentro de la huella de cobertura del Satélite). Reciben las señales en una banda de frecuencia (*uplink*), se amplifican, se hace transposición de frecuencias y se retransmite la señal (*downlink*), utilizan típicamente 2 bandas de operación; la Banda C (6 y 4 GHz.), que requiere coordinación de frecuencias con los enlaces de microondas y la banda Ku, reservada sólo para transmisiones satelitales, cuando se trabaja la Banda Ku extendida, una porción de la banda requiere coordinación de frecuencias con enlaces terrestres.

Como algunas aplicaciones se tiene: distribución de televisión, redes de negocios privadas, transmisión telefónica de larga distancia, entre otras.

- **Sistemas con estructura celular**

Wireless Local Loop (WLL)

- P.H.S (Phone Handy System)
- D.E.C.T. (Digital Enhanced Cordless Telephony)

Sistemas de Banda Ancha

- SSFH (Spread Spectrum Frequency Hopping)

- SSSS (Spread Spectrum Direct Sequence)
- LMDS (Local Multipoint Distribution System)
- MMDS.

- **Tecnología Wireless LAN (WLAN):** Presenta las siguientes categorías:

- *Infrarrojo (IR) LANs* : Para aplicaciones indoors.
 - El espectro infrarrojo no esta regulado
 - Equipos de bajo costo y sencillos
 - No penetra paredes
 - Reflejo por objetos de color: reflexión en el techo para cobertura completa del cuarto.
- *Spread Spectrum LANs:* Para aplicaciones indoor y outdoor.
 - Arreglo múltiple de celdas.
- *Microondas banda angosta:* Para aplicaciones indoor y outdoor.
 - Utiliza microondas para la transmisión de señales
 - Opera en la banda licenciada de 18 GHz (cobrimiento metropolitano).
 - Opera en la banda no licenciada de 5.8 GHz (50 a 100 metros).

- **Tecnología Bluetooth:** Principales características:

- Corto Alcance
- Utiliza la banda de 2.4 GHz
- Dispositivos alrededor de 10m pueden compartir hasta 720 kbps de
- Capacidad
- Soporta datos, gráficos, audio y video
- Tecnología frequency hopping
- Arquitectura de picoceldas
- Aplicaciones: comunicación inalámbrica y de red para computadores personales, teléfonos móviles y otros dispositivos inalámbricos.

2.3 EVOLUCIÓN DE LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS.

– A finales de los 1940s, Bell introduce el concepto celular, en lugar de utilizar el modelo *broadcast* o de transmisores de alta potencia localizados en un sitio elevado, transmitiendo la señal a una área amplia, el nuevo modelo de transmisores de baja potencia, diseñado específicamente para servir una pequeña área llamada “celda”.

– En ciudades grandes como New York, los potentes transmisores móviles fueron divididos en un gran número de pequeñas celdas, cada una equipada con un transmisor de baja potencia. Las mismas frecuencias (canales) podían ser reutilizadas en diferentes celdas con suficiente distancia.

– El concepto de re-uso de frecuencias es introducido. La interferencia no está relacionada con la distancia absoluta entre celdas, si no con la relación de la distancia entre celdas con la misma frecuencia (D) y el radio de la celda (R). El radio de la celda está determinado por la potencia del TX y la altura de la antena.

– Otro concepto introducido es el de *hand off*: no todas las llamadas móviles pueden ser completadas dentro de los límites de una celda. Para manejar esto, los sistemas celulares son equipados con su propia capacidad de conmutación y control. A través del continuo monitoreo de la intensidad de señal y otros parámetros recibidos de celdas individuales, el sistema celular puede determinar cuando una unidad móvil con una llamada en progreso pasa de una celda a otra y puede conmutar la llamada a la nueva celda sin interrupción.

– En 1971 la FCC aprueba una propuesta presentada por la compañía Bell para un nuevo sistema de radio FM análogo celular llamado *High-Capacity Mobile Telephone System (HCMTS)* y reserva 40 MHz en la banda de 850 MHz.

– En 1978 el sistema HCMTS es implementado como un sistema de desarrollo.

- El servicio celular comercial es introducido en 1983. El estándar análogo de U.S de 1980s y 1990s para radio celular: *Advanced Mobile Phone Service (AMPS)*, resultado proveniente de HCMTS.

2.3.1 GENERACIONES.

Generalmente en las comunicaciones móviles se hace referencia a las siglas 1G, 2G, 2.5G, 3G, 4G, estas no son más que la representación de las etapas de evolución de los sistemas inalámbricos. A continuación se cita sus características principales:

2.3.1.1 Primera Generación: Sistemas Análogos Celulares.

- AMPS de U.S
- Total Access Communications Systems (TACS) de U.K cercanamente relacionado en AMPS
- Nordic Mobile Telephone System (NMTS) de Escandinavia
- Nippon Advanced Mobile Telephone Service (NAMTS) de Japón
- NETZ-C de la República Federal de Alemania.

2.3.1.2 Segunda Generación: Sistemas Celulares Digitales.

– Los cuellos de botella en la capacidad, la proliferación de estándares incompatibles, la necesidad de que una persona utilice su teléfono celular en diferentes países, motivaron el desarrollo de la segunda generación de sistemas celulares con el objetivo de alcanzar una mayor capacidad y mejorar la compatibilidad.

– Los comités de estandarización para los sistemas celulares de segunda generación optaron por sistemas digitales debido a los aspectos de las técnicas de transmisión digital, que funcionan mejor en ambientes de alta interferencia y

tienen mayor potencial de alta capacidad que su contra parte, los sistemas análogos.

– El procesamiento digital de señales (DSP) y las técnicas de comunicaciones digitales también han liderado nuevas aplicaciones que incluyen computadores móviles, facsímile y otros servicios de procesamiento de información.

– Una de las ventajas de implementaciones digitales es que las técnicas digitales tienen un rápido y dramático mejoramiento en su desempeño, decrecen en costo y consumo de potencia.

– Las ventajas de las técnicas digitales en los sistemas celulares se pueden resumir en los siguientes aspectos:

- Avances en las técnicas de modulación digital: mejor utilización del espectro
- Menor tasa de bits en la codificación de voz digital: mayor eficiencia espectral
- Reducción del *overhead* para señalización: aumenta la capacidad del sistema, mayor número de canales para voz.

– Técnicas robustas de codificación de fuente y canal: mejoran el desempeño en ambientes móviles.

– Más robusto a la interferencia: mejor relación en la interferencia co-canal y de canales adyacentes.

– Flexibilidad en el ancho de banda: eficiencia en el uso del espectro permitiendo que los usuarios ajusten su ancho de banda y mejoren el tiempo para satisfacer sus necesidades actuales de comunicaciones.

– Inclusión de nuevos servicios: autenticación, servicios de datos, encriptación de voz y datos, y otros servicios de red integrada digital de servicios (ISDN).

– Mejoramiento en la eficiencia de acceso y control de hand-off: mayor capacidad de para el manejo de requerimientos de acceso y registro de usuarios móviles.

2.3.1.3 Tercera Generación y Subsecuentes.

– La tercera generación de sistemas celulares utiliza arquitecturas de sistemas con técnicas avanzadas de acceso múltiple por división en tiempo (TDMA), por división de código (CDMA), por censo de colisión (CSMA), spread spectrum (SS), secuencia directa (DS), salto en frecuencia (FH) y división en frecuencia (FDMA) de banda angosta.

– Concepto familia ITU-T (IMT 2000), dos miembros:

- UMTS (Universal Mobile Telecommunication System (3 GPP)
 - Evolución redes GSM (MAP, GPRS)
 - Interface de radio WCDMA
 - Otras posibles interfaces de radio (TD/CDMA)

- CDMA 2000, desarrollada por 3GPP2
 - Evolución sistema CDMA IS-95 (ANSI 41)

Resulta interesante destacar que en América latina, y debido al dominio regional que se empieza a observar de los operadores América Móvil de México y Telefónica de España la mayoría de las redes evolucionaran a partir de GSM.

2.3.2 EVOLUCIÓN DE GSM A 3G

- Creación de nuevos servicios y nuevo modelo de negocios (WAP, CAMEL, SIM toolkit, seguridad en m-commerce.

- GPRS (General Packet Radio Service): conmutación de paquetes y posibilidad de estar siempre conectado, hasta 43 kbps (teóricamente 100 kbps).
- EDGE (Enhanced Data Rates for GSM evolution): capacidad triplicada, opción para operadores sin licencia de 3G.
- GPRS+EDGE también para TDMA IS-36.

2.3.3 SERVICIOS DE COMUNICACIÓN MÓVIL NO CELULAR

Muchos servicios de comunicación móvil no celular están operando actualmente. Sus usuarios incluyen compañías de taxis, personal de bomberos, policía, servicios médicos y de emergencia, etc. Ejemplo de esta tecnología es el radio móvil privado y los sistemas móviles satelitales.

Los sistemas radio móviles privados (PMR) operan en la banda de VHF y UHF. En el mundo los estándares más utilizados para este tipo de sistemas son el APCO (USA) y TETRA (Europa).

2.4 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN MÓVIL

Cuando se diseña un sistema de comunicación móvil celular se divide la zona de cobertura deseada en zonas más pequeñas llamadas *células* o *celdas*, a las cuales se les asigna un cierto número de radiocanales.

Una *Célula* o *Celda* es cada una de las unidades básicas de cobertura en que se divide un sistema celular. Cada célula contiene un transmisor (una Radio Base) - que puede estar en el centro de la célula. Cada célula, además de varios canales de tráfico, tendrá uno o más canales de señalización o control para la gestión de los recursos radio y la movilidad de los móviles a ella conectados. La agrupación de Celdas es denominada *Cluster*.

La agrupación de Clusters forma el sistema de comunicación el cual a su vez debe ofrecer las siguientes características:

- Cobertura y Movilidad.
- Capacidad.
- Calidad.
- Utilización eficaz del espectro.
- Capacidad de expansión, entre otras.

2.4.1 Cobertura y Movilidad

En sentido genérico, se entiende por cobertura la zona desde la cual un terminal móvil puede comunicarse con las estaciones base y viceversa. Es en el primer parámetro en que se piensa al diseñar una red de comunicaciones móviles: ¿en qué zonas se va a dar servicio a los terminales móviles?

En primer lugar, la cobertura o el alcance radio de una red es la composición del alcance radio de la suma de todas sus estaciones de base. A la hora de planificar una red, desde el punto de vista de la cobertura, el primer dato que se necesita saber es la zona que se desea cubrir, o zona de servicio. Si se parte de esta única hipótesis, dado un área a cubrir, sería necesario un número de células tal que la suma de las áreas cubiertas por dichas células, a una altura determinada h_b y transmitiendo a su máxima potencia P_{max} , fuera igual al área a cubrir.

Ahora bien, debemos tener en cuenta que no basta con realizar el cálculo de potencia en el sentido estación base a móvil (*Downlink*); también es necesario que el móvil, en función de su capacidad de transmisión, pueda llegar hasta la estación base (*Uplink*). Por ello, la cobertura de la red debe planificarse teniendo en cuenta las condiciones de transmisión en las que se encuentra el móvil: es a lo que se denomina realizar un balance de enlace. Actualmente, las redes se diseñan teniendo en cuenta varios tipos de móviles: la máxima cobertura se ofrece para terminales instalados en vehículos, con antena

exterior, y también se realizan provisiones para equipos portátiles en el exterior y en interior de vehículos, sin antena externa.

Debido a las características particulares del trayecto radioeléctrico, únicamente puede hablarse de cobertura en sentido estadístico. Esto implica que, las áreas que se representan teóricamente cubiertas, lo están en un determinado porcentaje de ubicaciones y de tiempo. Existen gráficas, obtenidas de medidas empíricas sobre propagación, que muestran las correcciones en atenuación que se deben realizar para calcular correctamente el área de cobertura de un transmisor radio, así como la probabilidad de cobertura asociada a dichas correcciones.

Hasta aquí todo es aplicable a casi cualquier sistema que tenga la radio como medio de transmisión. Lo que diferencia a un sistema celular es que, en zonas de alta densidad de tráfico, es capaz de utilizar más eficientemente que otros sistemas el limitado espectro radioeléctrico que tiene asignado. Esto implica un diseño de red radio denominado "celular", que es lo que le da el nombre al sistema.

El método consiste en dividir el área a cubrir en un número de células suficientemente grande, que permita la reutilización de frecuencias. Estos conceptos serán explicados con más detalle más adelante. Desde el punto de vista de cobertura, lo que esta división en pequeñas células implica es que la cobertura de cada célula va a estar limitada por interferencia; es decir, el diseño se hará de forma tal que las células que utilizan los mismos canales de radio emitan a una potencia suficientemente baja para no interferirse entre si y, a su vez, no interferir a los móviles a los que están dando servicio. En definitiva, el máximo alcance de una célula sólo se podrá conseguir en lugares de poca densidad de tráfico, que no son los más adecuados para este tipo de sistemas.

2.4.2 Capacidad.

Es la cantidad de tráfico que puede soportar este tipo de sistemas. El diseño de una red celular está pensado para soportar una gran capacidad de tráfico esto se logra usando técnicas de acceso al canal y división celular,

Al ser un sistema de concentración de canales, la capacidad por cada bloque de canales se calcula mediante la aplicación de la fórmula de Erlang B (ver anexo A), es decir, como un sistema de llamadas perdidas (sin colas).

La capacidad que aporta este tipo de sistemas es función del número de canales utilizado, o ancho de banda disponible, del tamaño de las células y de la configuración en racimos o "clusters". La capacidad será mayor cuanto mayor ancho de banda se disponga, cuanto menor sea la célula y cuantas menos células sean necesarias por "cluster". Este último parámetro estará fuertemente ligado a la relación de interferencia co-canal que el sistema sea capaz de soportar. Respecto al tamaño de la célula, este estará limitado por la capacidad del protocolo de gestión de la movilidad y por la velocidad a la que se desplacen los móviles en la zona de servicio.

El diseño de la capacidad de los sistemas se realiza por zonas, tomando cada estación base independientemente, suponiendo el caso de tráfico más desfavorable; es decir, el tráfico en la hora pico.

2.4.3 Reutilización de Frecuencias

Esta es la técnica que permite diferenciar a los sistemas de concentración de canales frente al resto. Se trata de tomar todo el grupo de frecuencias asignado a la red y, dividiendo el grupo en varios subgrupos - células - y ordenándolo según una estructura celular - racimo - se pueden construir grandes redes con las mismas frecuencias sin que estas interfieran entre sí.

2.4.4 Señalización

Por señalización se entiende toda comunicación dedicada a gestionar los recursos del sistema para permitir la comunicación. Al hablar de

comunicaciones celulares, se va a tratar de forma diferente la señalización asociada a la transmisión de radio y la relativa a la propia estructura de red. Como se verá más adelante, ambos "tipos" de señalización sirven a los mismos propósitos, y sólo se diferencian por el tipo de entidades a las que ponen en comunicación. Funcionalmente, se podría distinguir entre:

- señalización destinada a la gestión de los recursos de radio;
- señalización destinada a la gestión de la movilidad; y,
- señalización destinada al establecimiento de la comunicación, que, además, puede ser común con otros sistemas de comunicación y, en particular, debe ser compatible con las redes fijas a las que las redes celulares se conectan.

2.4.5 Handover o Traspaso

Es como se denomina al proceso de pasar una comunicación de un mismo móvil de un canal a otro. Es lo que diferencia a un sistema celular de otro tipo de sistemas de radiocomunicaciones de concentración de enlaces. En función de la relación entre los canales origen y destino de la comunicación, los handover pueden clasificarse en:

- handover intercelular, si el canal destino se encuentra sobre otra frecuencia distinta a la del origen, pero en la misma célula;
- handover interBSC, cuando hay cambio de célula pero ambas células se encuentran dentro del mismo sistema controlador de estaciones base;
- handover interMSC, cuando hay cambio de célula y de controlador de estaciones base (BSC), pero ambos BSC dependen de la misma central de conmutación móvil (MSC); y, finalmente,
- handover entre MSCs, cuando hay cambio de célula y ambas células dependen de MSCs distintas.

Para entender un poco más lo expuesto anteriormente, se hará una breve presentación (sin ánimo de profundizar en el tema) de la estructura básica de una red de telefonía móvil.

2.5 ESTRUCTURA DE UNA RED DE TELEFONÍA MÓVIL CELULAR

Las células que dan cobertura en el área de incidencia de la red celular constituyen sólo la primera capa de la red. Sobre ella, se monta toda una infraestructura con el fin de crear una red telefónica completa capaz de dar todo el servicio telefónico móvil por sí misma y de conectarse con la red fija para unir a los usuarios móviles con el resto de la red o redes telefónicas. Vamos a ver en este punto cada uno de los elementos que permiten la comunicación a través de un sistema de telefonía móvil.

La red se encarga de encaminar las llamadas originadas por los móviles, a través de la misma red, hasta otro terminal móvil a través de los **TSC**, o bien por la red telefónica pública conmutada (**PSTN**) hasta un terminal fijo.

Los elementos de una red de telefonía móvil (Ilustración 2) son básicamente los siguientes:

- ♦ **Estaciones Móviles (MS).**
- ♦ **Transceptores de Estaciones Base (BTS):** Proporcionan cobertura radioeléctrica a una célula (o a varias si se utiliza sectorización). Incorporan todos los equipos de radio necesarios para comunicar con las estaciones móviles de cada célula.

Las funciones más importantes son: codificación/decodificación de los canales, cifrado/descifrado del camino radio y medidas de la intensidad de la señal.

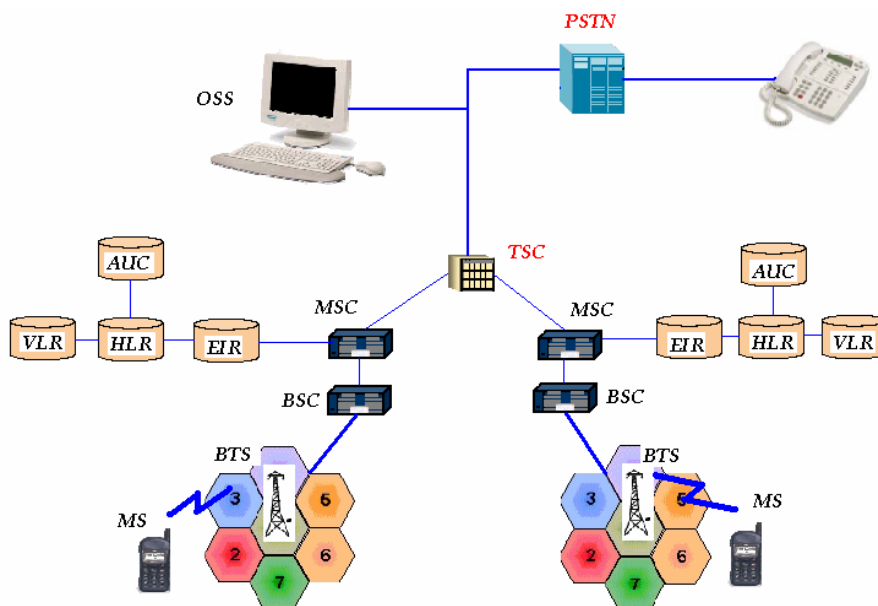


Ilustración 2.2 Elementos de la arquitectura de un sistema de telefonía móvil

- ♦ **Controlador de Estaciones Base (BSC).** Hace de interfaz entre el sistema de estaciones base y el sistema de conmutación. Realiza las siguientes funciones: gestión de los canales radio, supervisión de las estaciones base, traspaso entre canales de la BSC y gestión de la transmisión hacia las estaciones base entre otras.
- ♦ **Central de conmutación de móviles (MSC).** Básicamente se ocupa de la conmutación telefónica. Realiza las funciones de establecimiento, enrutamiento, control y terminación de las llamadas, gestión de los traspasos de llamadas (*Handover Hand-off*) entre centrales, gestión de servicios suplementarios y recogida de datos de tarificación y contabilidad.
- ♦ **Registro de abonados locales (HLR).** Es la base de datos local que contiene información de todos los abonados móviles, relativa a su suscripción y servicios suplementarios. Normalmente un HLR proporciona servicio a varios MSC. También guarda información de la situación de los abonados, de forma que las llamadas entrantes se puedan encaminar correctamente.

- ♦ **Registro de abonados (VLR).** Se trata de una base de datos que utiliza una MSC para todos los abonados que en un momento dado están en su área de servicio.
- ♦ **Centro de Autenticación (AuC).** Contiene las claves de identificación de los abonados que permite una comprobación para el acceso a la red.
- ♦ **Registro de identidad de equipos (EIR).** Es una base de datos que guarda información relativa al equipo móvil (fabricante, nº de serie,...). Se puede utilizar el EIR para bloquear estaciones móviles robadas, protegerlas contra usos indebidos y realizar estadísticas.

El diseño y la planificación de la estructura de la red telefónica es un elemento importante ya que implica niveles de costos de inversión en la construcción y mantenimiento de la plataforma además de determinar los parámetros de calidad en el servicio, ésta es una de las tantas razones por las cuales la investigación en el campo de Radio propagación se halla en constante desarrollo.

2.6 ESQUEMAS DE ACCESO AL MEDIO

2.6.1 Métodos de Duplexación

En sistemas de comunicación inalámbrica la dirección de la información de la estación base (BS) hacia la unidad móvil (MS) es referenciada como dirección *forward* ó *downlink* y de la unidad móvil (MS) a la unidad base (BS) como dirección *reverse* ó *uplink*.

2.6.1.1 Duplexación por división de frecuencia (Frequency Division Duplexing FDD): En este método el ancho de banda total disponible (W) es

reservado tanto para la transmisión en dirección *forward* (W_f) como *reverse* (W_r).

En teoría las dos sub-bandas no necesariamente tienen que ser completamente contiguas. El *uplink* y el *downlink* utilizan bandas de frecuencia separadas

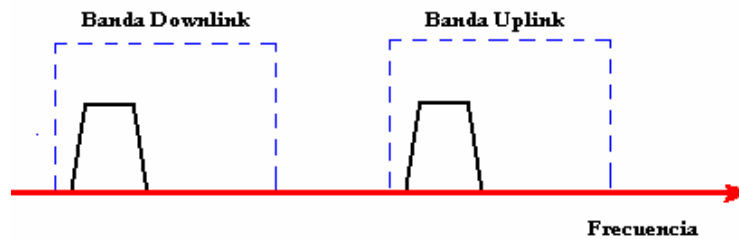


Ilustración 2.3 Duplexación por división de frecuencia

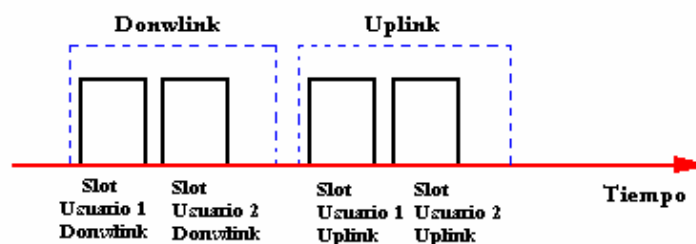


Ilustración 2.4 Duplexación por división de tiempo.

2.6.1.2 Duplexación por división de tiempo (Time Division Duplexing TDD): Las dos direcciones de transmisión son creadas alternando la transmisión en el tiempo.

El *uplink* y el *downlink* comparten la misma banda de frecuencia pero son transmitidas en tiempos diferentes.

2.6.2 Métodos de Acceso al canal

Son las tecnologías que permiten que varios usuarios accedan al espectro limitado de un sistema inalámbrico. A continuación se mencionan los más utilizados.

2.6.2.1 Acceso Múltiple por división de tiempo (Time Division Multiple Access TDMA):

TDMA es una tecnología de transmisión digital que permite que un número de usuarios tenga acceso a un canal sencillo de RF sin interferencia, reservando únicos *slots* de tiempo para cada usuario dentro del canal. Incrementa la eficiencia de transmisión, puede ser fácilmente adaptada para transmitir comunicaciones de datos y voz.

Soporta tasa de datos desde 64kbps hasta 120Mbps (nx64kbps). Se pueden ofrecer servicios de comunicaciones personales incluyendo, fax, datos, servicios de mensajes cortos (SMS), multimedia y video-conferencia.

Con instalaciones TDMA se tiene un ahorro sustantivo en las estaciones base, en el espacio y mantenimiento, un factor importante cuando el tamaño de las celdas se hace pequeño.

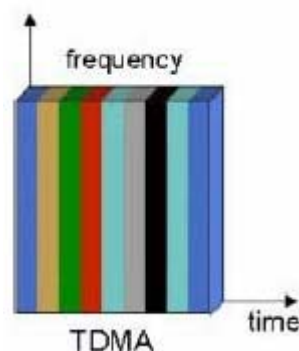


Ilustración 2.5 TDMA.

TDMA es la mejor tecnología en cuanto costo-beneficio para actualizar los sistemas análogos actuales a digitales. Es la única tecnología que ofrece una eficiente utilización jerárquica de la estructura celular, ofrece pico, micro y macroceldas. Es compatible con sistemas análogos FDMA, lo que permite la compatibilidad de servicios con *dual-mode handsets*.

Como desventajas de la tecnología TDMA, se tiene la distorsión multicamino o multipath.

TDMA Avanzado (ETDMA): Los *time slots* son reservados para una conversación específica sin importar si alguien o no está hablando en ese

momento. Para corregir este problema la versión mejorada de TDMA (ETDMA) en lugar de determinar cuando un usuario esta transmitiendo, asigna a los usuarios los *slots* dinámicamente. ETDMA envía datos en las pausas que una conversación normal tiene. Cuando un suscriptor tiene algo que transmitir, éste pone un bit en el buffer de cola, el sistema revisa el buffer notando que el usuario tiene algo que transmitir y le reserva ancho de banda acordemente. Si el usuario no tiene nada que transmitir, la cola simplemente va al siguiente suscriptor.

2.6.2.2 Acceso múltiple por división de frecuencia (Frequency Division Multiple Access FDMA): El sistema de FDMA reserva un canal a un usuario en un tiempo determinado. Si la transmisión en el trayecto se deteriora el sistema conmuta a otro canal.

Aunque FDMA técnicamente es simple de implementar no hace un uso óptimo del ancho de banda: el canal es reservado para una simple conversación este o no alguien hablando.

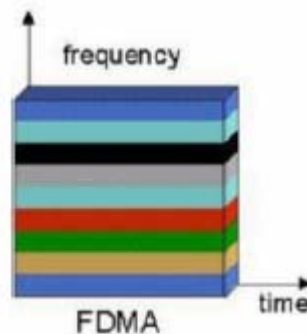


Ilustración 2.6 FDMA.

2.6.2.3 Acceso múltiple por división de código (Code Division Multiple Access CDMA): CDMA utiliza códigos únicos que dispersan los datos en banda base antes de la transmisión. La señal es transmitida por un canal, y su nivel se encuentra por debajo del nivel de ruido de otras señales.

El receptor utiliza un correlacionador para recuperar (*despread*) la señal deseada, la cual se pasa por un filtro pasabanda de banda angosta. Las señales indeseadas no serán recuperadas y no pasarán a través del filtro.

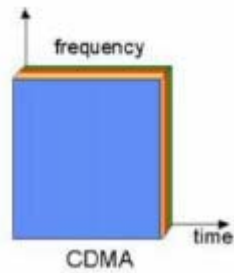


Ilustración 2.7 CDMA.

2.6.2.4 Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiple Access OFDMA).

OFDMA es una técnica de múltiple acceso basada en el concepto OFDM donde a cada usuario se le asignan dinámicamente uno o un grupo de tonos cada vez que tiene información que transmitir.

OFDM es una técnica que divide el espectro en un número de tonos igualmente espaciado que tienen la propiedad de ser ortogonales entre sí. Esto permite que el espectro de cada tono se sobrelape sin interferir el uno con el otro, reduciendo el ancho de banda de transmisión.

CAPITULO 3

ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN

Es importante conocer las propiedades de las variaciones en el tiempo, frecuencia y espacio, que causa un radio canal de comunicación inalámbrica a una señal de información y como los modelos de propagación pueden vincularse a éste proceso. Este conocimiento es indispensable para entender los fenómenos ocurrientes en la radio propagación y que son de relevante importancia al momento de diseñar las redes de sistemas de comunicación móvil.

En éste capítulo se presenta el estado del arte de los modelos de propagación utilizados para describir el comportamiento de los radio canales en los sistemas de comunicación móvil. Los aspectos de radio propagación cubiertos aquí, son tomados desde un punto de vista básico. Dichos aspectos son fundamentales para modelar canales y han sido estudiados por muchos años, sin embargo, debido al surgimiento de sistemas en nuevas bandas de frecuencia (por ejemplo UMTS a 2GHz y WLAN a 5GHz) los escenarios de propagación han cambiado. Al mismo tiempo, el aumento en el uso de las comunicaciones móviles exige mejores procedimientos de predicción en los diferentes tipos de entorno; como consecuencia se tiene un replanteamiento constante de las técnicas de predicción y simulación a través de modelos de propagación.

Éste capítulo es dividido, de acuerdo a la metodología de modelado, en secciones sobre modelamiento empírico-estadístico, modelamiento determinístico y finalmente una combinación del modelamiento estadístico y determinístico inicialmente, se presenta una breve introducción a la caracterización de la propagación multitrayectoria.

3.1 PROPAGACIÓN MULTITRAYECTORIA

En las comunicaciones inalámbricas personales (PCS, Personal Communications Systems) y en general los sistemas de comunicación celular, el radio canal es descrito como un canal de propagación multitrayectoria, en donde el MS puede estar estático o en movimiento. Tanto en la BS como en el MS, la señal recibida será la sumatoria de múltiples ondas de radio que llegan de diferentes direcciones y con diferentes magnitudes y fases, esto significa que la señal que

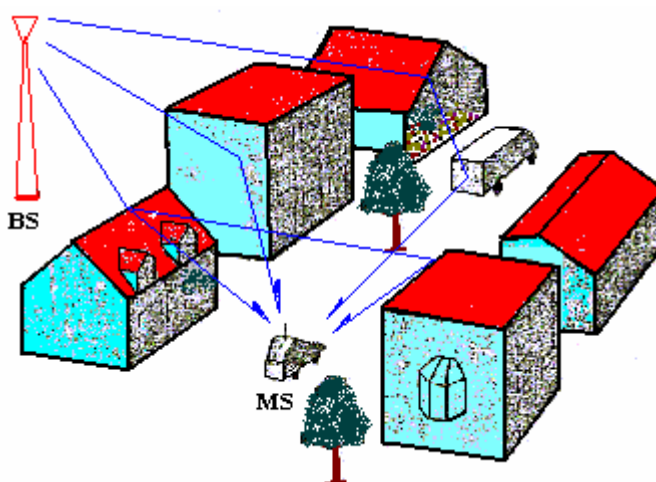


Ilustración 3.1 Fenómeno Multipath.

recibe un abonado, transmitida desde una base estación, es la superposición de muchas ondas que viajan a lo largo de diferentes trayectorias. Como consecuencia de esto, el nivel de la señal transmitida experimenta una atenuación o desvanecimiento llamado desvanecimiento multicamino (multipath fading). Ver la ilustración 3.1.

El desvanecimiento multicamino es un fenómeno común en los sistemas de comunicación inalámbrica, esto hace que sea uno de los fenómenos más importantes al momento de describir o modelar un canal de transmisión.

La propagación de las ondas es generalmente descrita con tres mecanismos básicos; estos son reflexión, difracción y dispersión (scattering)¹¹, estos mecanismos se muestran en la ilustración 3.2

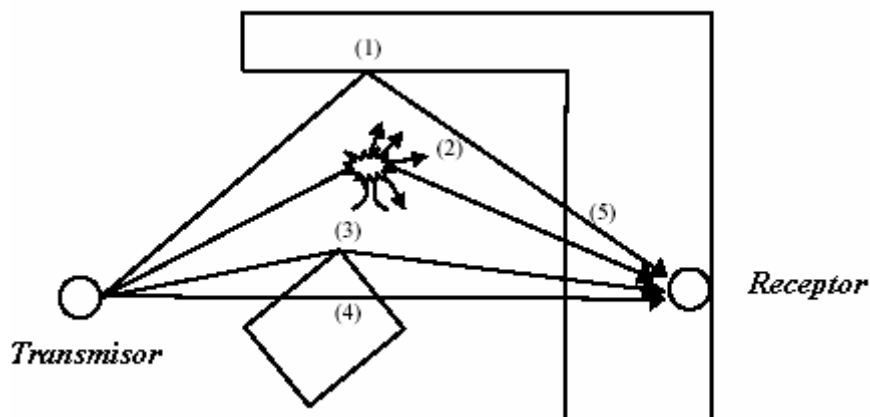


Ilustración 3.2. Representación de los mecanismos de (1) reflexión, (2) scattering, (3) difracción, (4) transmisión y (5) penetración dentro de edificios.

Las ondas electromagnéticas que llegan de cierta dirección a una superficie con dimensiones mayores comparadas a la longitud de onda son (parcialmente) reflejadas por ésta superficie. La intensidad de la onda reflejada depende de la frecuencia, el tipo de material, la polarización de la onda y el ángulo de incidencia. La difracción puede ser explicada como una dispersión aparente de las ondas alrededor de los obstáculos. La reflexión y difracción puede ser modelada usando la teoría de óptica geométrica (GO) y la teoría uniforme de difracción (UTD)¹². Scattering es la dispersión de las ondas de radio debido al contacto con objetos de estructuras o superficies irregulares (vegetación, postes de luz, puentes); el tamaño de dichas irregularidades está en el orden de la longitud de onda de las señales propagadas.

¹¹ Rappaport, T.S, “Wireless Communications – Principles and Practice”, Prentice Hall, New Jersey, U.S.A., 1996.

¹² Dooren van, G.A.J., “A deterministic approach to the modelling of electromagnetic wave propagation in urban environments”, 1994.

Además de la difracción, reflexión y scattering, existen otros mecanismos importantes involucrados en la radio propagación (ver ilustración 3.2).

La transmisión a través de las paredes juega un papel importante para describir la propagación en áreas urbanas y entornos cerrados (indoor).

Para evaluar analíticamente el fenómeno multitrayectoria, es necesario estudiar las propiedades de una señal portadora transmitida por una estación base, ésta puede ser expresada de la siguiente forma:

$$s_0(t) = a_0 e^{j(\omega_0 t + \phi_0)} \quad (3.1)$$

$$s_0(t) = \text{Re} \{ a_0 e^{j(\omega_0 t + \phi_0)} \} \quad (3.2)$$

$$s_0(t) = a_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0) \quad (3.3)$$

a_0 representa la amplitud y ϕ_0 la fase. Ambas son consideradas constantes.

La frecuencia angular ω_0 es igual a $2\pi f_0$, donde f_0 es la frecuencia portadora.

En el desvanecimiento multicamino, ocurren principalmente las siguientes tres situaciones:

- Cuando el receptor y los elementos interferentes¹³ son estáticos.
- Cuando el receptor es estático y los elementos interferentes están en movimiento.
- Cuando tanto el receptor como los elementos interferentes se encuentran en movimiento.

En la primera situación, en donde tanto el receptor como los elementos interferentes se encuentran sin movimiento, las trayectorias individuales de cada señal recibida, pueden ser identificadas teóricamente. El modelo para ésta situación, se aprecia en la ilustración 3.3.

¹³ Se entiende por elemento interferente, aquellos obstáculos que pueden causar interferencia a la transmisión de la señal (edificios, autos, árboles, postes de luz, puentes, peatones, etc.)

La señal $S(t)$ que recibe el receptor, compuesta de N señales, puede ser expresada mediante la ecuación:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N a_i s_0(t - \tau_i) \quad (3.4)$$

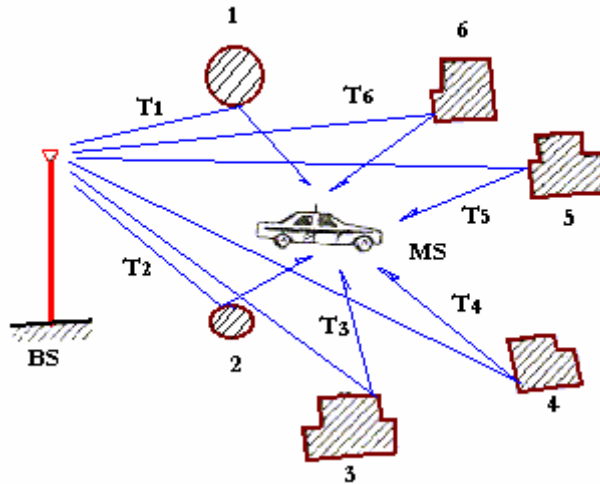


Ilustración 3.3. Señal recibida en un instante.

El tiempo total de propagación para la i -ésima trayectoria, puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$\tau_i = \bar{\tau} + \Delta\tau_i \quad (3.5)$$

Donde $\Delta\tau_i$ es el retardo relativo adicional de la i -ésima trayectoria, expresada como la desviación con respecto al promedio, y $\bar{\tau}$ es definido como sigue:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i \quad (3.6)$$

En la ecuación (3.4) a_i es el factor de atenuación de la i -ésima trayectoria, el cual puede ser un valor complejo. Si se sustituye el valor de $s_0(t - \tau_i)$ en la ecuación (3.4) por la expresión de $s_0(t)$ de la ecuación (3.1), se tiene entonces:

$$S(t) = x(t - \bar{\tau})e^{j(2\pi f_0(t - \bar{\tau}) + \phi_0)} \quad (3.7)$$

Donde la envolvente $x(t)$ de la señal recibida $S(t)$ es expresada como:

$$x(t) = a_0 \sum_{i=1}^N a_i e^{-j2\pi f_0 \Delta \tau_i} \quad (3.8)$$

Con a_0 siendo constante, como previamente fue establecido, y el lado derecho de la ecuación (3.8) representando el fenómeno de multitrayectoria.

Con lo expuesto anteriormente se quiere demostrar la dependencia con respecto a la trayectoria de la señal que llega al receptor, que en últimas se ve reflejada en las variaciones de fase de las múltiples señales. Sin embargo la ecuación (3.8) es independiente del tiempo t , entonces $x(t)$, también es constante con respecto al tiempo, esto significa que la envolvente de la señal recibida $S(t)$ permanece por tanto invariable con respecto al tiempo mientras el receptor y los elementos interferentes estén estáticos (es por lo tanto un proceso estacionario).

En la segunda situación, donde el receptor está estático y los elementos interferentes se encuentran en movimiento, tanto el retardo de tiempo τ_i , como el factor de atenuación a_i , son dependientes de los instantes de tiempo. Vea la ilustración 3.4.

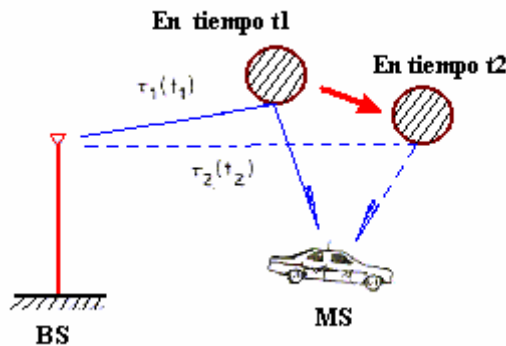


Ilustración 3.4. Señal recibida en diferentes instantes de tiempo.

Bajo estas condiciones, la señal recibida $S(t)$ representada en la ecuación (3.4) debe ser reformulada en:

$$S(t) = x(t)e^{j\phi_0} e^{j2\pi f_0 t} \quad (3.9)$$

Donde

$$x(t) = \sum_{i=1}^N a_0 a_i(t) e^{-j2\pi f_0 \tau_i(t)} \quad (3.10)$$

Considerando

$$R = \sum_{i=1}^N a_i(t) \cos[2\pi f_0 \tau_i(t)] \quad (3.11)$$

$$S = \sum_{i=1}^N a_i(t) \sin[2\pi f_0 \tau_i(t)] \quad (3.12)$$

Entonces

$$x(t) = a_0 \{R - jS\} \quad (3.13)$$

Donde la amplitud y la fase de $x(t)$ son expresadas como variables dependientes del tiempo:

$$A(t) = a_0 \sqrt{R^2 + S^2} \quad (3.14)$$

$$\psi(t) = \tan^{-1}\left(\frac{S}{R}\right) \quad (3.15)$$

Sin embargo es virtualmente imposible aislar e identificar cada una de las trayectorias de las señales reflejadas de los elementos interferentes (actualmente este es un tema de investigación donde por medio de arreglos de antenas se puede estimar la dirección de llegada de diferentes trayectorias; DoA), es por tanto, necesario un análisis estadístico de las variables dependientes del tiempo (amplitud y fase). Más adelante será presentado el análisis estadístico aplicado a las comunicaciones móviles.

Al existir un movimiento de los elementos interferentes, se puede asumir que el receptor experimenta un movimiento relativo. Bajo esta consideración, tres casos pueden ser considerados:

- La ausencia de dispersión de la señal al llegar al receptor.
- La presencia de una dispersión simple de la señal que llega al receptor.
- La presencia de mucha dispersión de la señal en los alrededores del receptor.

Si se asume que el receptor se mueve en una dirección positiva x , a una velocidad V y recibe una señal que forma un ángulo θ con respecto a x , como se aprecia en la ilustración 3.5, la señal recibida se puede expresar como:

$$s_0(t) = a_0 e^{j(\omega_0 t + \phi_0 - \beta V \cos \theta)} \quad (3.16)$$

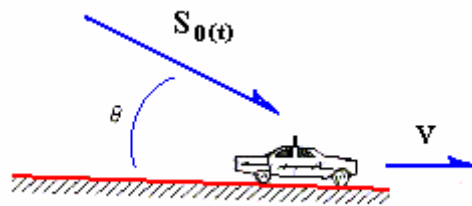


Ilustración 3.5. Receptor en movimiento relativo.

Donde $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ es el número de onda, siendo λ la longitud de onda. De esto una frecuencia adicional es contribuida como resultado del movimiento del receptor y es debido al efecto Doppler. Esta frecuencia Doppler adicional es expresada como sigue:

$$f_d = f_m \cos \theta \quad (3.17)$$

Donde $f_m = \frac{V}{\lambda}$ es la máxima frecuencia Doppler. La frecuencia Doppler puede ser tanto positiva como negativa, dependiendo del ángulo de incidencia θ . (esto depende de si el MS se aleja o se acerca de la fuente)

La ecuación (3.16), puede quedar entonces como:

$$s_0(t) = a_0 e^{j(\omega_0 t + \phi_0 - 2\pi f_d t)} \quad (3.18)$$

En las comunicaciones aéreo-terrestres, el efecto Doppler sobre la frecuencia de modulación puede ser significativo debido a las altas velocidades relativas de vuelo de los aviones (o de los satélites en el caso de los sistemas de baja o mediana altitud).

En la tercera y última situación, donde tanto el receptor como los elementos interferentes se encuentran en movimiento, la señal total que se recibe es la suma de todas las señales dispersadas a diferentes ángulos θ_i .

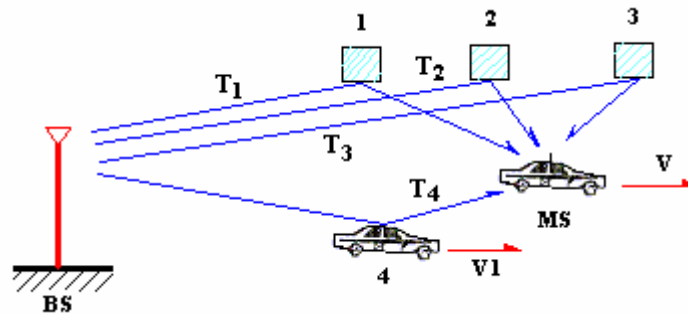


Ilustración 3.6 Receptor y elementos interferentes en movimiento.

Esta situación compleja es expresada en la siguiente ecuación:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N a_o a_i e^{j(\omega_0 t + \phi_0 - \beta V t \cos \theta_i + \phi_i)} = A_t e^{j\psi_t} e^{j(\omega_0 t + \phi_0)} \quad (3.19)$$

Donde:

$$A_t = \left[\left(a_0 \sum_{i=1}^N a_i \cos \psi_i \right)^2 + \left(a_0 \sum_{i=1}^N a_i \sin \psi_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.20)$$

$$\psi_t = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^N a_i \sin \psi_i}{\sum_{i=1}^N a_i \cos \psi_i} \quad (3.21)$$

$$\psi_i = \phi_i - \beta V t \cos \theta_i \quad (3.22)$$

Se debe notar que la forma de la ecuación (3.9) relacionada con el movimiento de los elementos interferentes, es muy similar a la ecuación (3.19) que incluye el movimiento relativo del receptor con respecto a los elementos interferentes.

Las características antes mencionadas son analizadas por los modelos de propagación y de canal desde diferentes puntos de vista, esto es de acuerdo al tipo de entorno y tipo de canal de comunicación a través del cual ocurre la propagación de la señal de información (la cual puede ser de banda ancha o banda angosta). Esto es explicado en las siguientes secciones.

Es importante diferenciar entre el ancho de banda del canal y el ancho de banda de la señal. Para ciertos entornos una señal se puede comportar como de banda angosta y en otros casos como de banda ancha según el canal, el cual podría verse como un filtro con ciertas características de ancho de banda.

3.1.1 Caracterización de la propagación.

- **Banda Angosta**

En el modelado banda angosta, son características las fluctuaciones en espacio y tiempo de la amplitud y fase de la señal recibida. Una onda de radio viajando a través de un determinado entorno, se deterioraría en magnitud debido a los mecanismos anteriormente mencionados más, las pérdidas por espacio libre. Estos efectos pueden ser caracterizados como una superposición de pérdidas por trayectoria (path loss), de desvanecimiento a gran escala (large-scale fading) y de desvanecimiento a pequeña escala (small-scale fading).

Los conceptos de gran y pequeña escala hacen referencia a las dimensiones del área estudiada. Efectos a gran escala son registrados sobre grandes distancias (mayores a la longitud de onda de la señal), mientras que efectos a pequeña escala son registrados sobre distancias cortas (unas pocas longitudes de onda). Para movimientos del MS (receptor móvil) en un área local pequeña (unos cuantos metros), es razonable asumir que la composición de las ondas

no cambia, únicamente las fases de las ondas. Esos cambios de fase causan fluctuaciones rápidas en la señal recibida, llamadas desvanecimiento rápido o *fast fading*. También, proporcional a la velocidad de movimiento del MS, las componentes multitrayectoria experimentan un aparente cambio de frecuencia llamado *Doppler shifts*. Aún cuando el MS sea estacionario, la señal recibida puede experimentar *fast fading* debido al movimiento de objetos en los alrededores.

Cuando el MS se mueve sobre un área más extensa (cientos de metros), la composición de las ondas también cambiará. Existen componentes que serán obstruidas mientras, otras serán originadas por fuentes secundarias debido a la difracción. Las fluctuaciones resultantes de los movimientos sobre extensas áreas son llamadas desvanecimiento a gran escala, *slow fading* o *shadowing*. Las pérdidas por trayectoria son determinadas por el promedio de las señales recibidas y depende básicamente de la distancia entre receptor y transmisor y de las características del entorno.

- **Banda Ancha**

Debido a la propagación multitrayectoria el radio canal será dispersado en tiempo y espacio. Esto significa que la respuesta al impulso del canal no será un eco singular si no una secuencia de pulsos dispersos en tiempo y espacio. Si el tiempo de llegada entre el primer y último eco significativo es mucho mayor que la duración de un símbolo digital (representación de la palabra binaria en una forma de onda modulada digitalmente), entonces el sistema será definido como un sistema de banda angosta. Sin embargo, si éste no es el caso, el tiempo de dispersión canal tendría un efecto sobre la forma de la señal recibida. En éste caso el sistema es definido como sistema de banda ancha. Así, el hecho de que un sistema sea de banda angosta o banda ancha, dependerá de la duración de un símbolo y de las características del canal.

La respuesta al impulso es frecuentemente usada para describir los canales, es un parámetro útil para la caracterización del canal, ya que puede ser usada

para predecir y comparar el desempeño de diferentes sistemas de comunicaciones móviles y anchos de banda de transmisión para una condición particular del canal.

3.2 MODELADO ESTADÍSTICO O EMPÍRICO

En el modelamiento empírico-estadístico las características del canal son deducidas a partir de los datos muestrales obtenidos en campañas de medidas. A continuación se presenta el modelamiento de las variaciones a pequeña escala, gran escala y pérdidas por trayectoria (path loss).

3.2.1 Modelos Path Loss

Son frecuentemente derivados a partir de la regresión lineal de los datos muestrales. Son adecuados cuando se requiere realizar una predicción rápida y sencilla, obviamente no son recomendados para situaciones en las que se requiere un nivel de predicción alto. A continuación se describen los modelos path loss para celdas pequeñas (micro celdas) en áreas urbanas alrededor de los 2GHz, la cual es la banda de frecuencia para los sistemas UMTS y los empleados para entornos *indoor* en las bandas de 5GHz, donde operan los sistemas de LANs inalámbricas.

3.2.1.1 Modelos semi-empíricos para microceldas urbanas (outdoor)

La mayoría de los modelos consideran dos importantes mecanismos de propagación en las zonas urbanas: la propagación sobre los techos de los edificios y la propagación a lo largo de las vías.

Para el primer caso, extensas mediciones y procedimientos de modelado han sido hechos para la banda de 900MHz (GSM en Europa). Un modelo bien

conocido (y que será tema del capítulo 5), basado sobre la teoría de difracción y factores de corrección empíricos, es el modelo COST231-Walfisch-Ikegami¹⁴. Para describir la propagación a lo largo de las calles o vías, se han realizado análisis para frecuencias sobre los 2GHz. Aquí los modelos empleados son nuevamente el COST231-Walfisch-Ikegami y Uni-Valencia¹⁵, los cuales se han desarrollado hasta el punto de ser clasificados actualmente como modelos semideterminísticos (los cuales serán tema de la siguiente sección). Los resultados para dichos modelos indican un error promedio de predicción de ± 2 dB (± 32 dBm) con una desviación estándar de 8 dB. Con los resultados obtenidos previamente en la UIS con el modelo ajustado a condiciones andinas, basados en el modelo COST231-Walfisch-Ikegami se obtuvo una desviación estándar promedio de 7.6dBm y los siguientes resultados generales a 880.11MHz:

- Error Típico: 1.85-12.08dBm
 - Desviación Estándar: 2.89-12.08dBm
 - Diferencias Mínimas: 0.02-2.68dBm
 - Diferencias Máximas: 8.16-36.83dBm
 - Media promedio de las diferencias: -4.69dBm
- (Intervalo de confianza de 2.94dBm al 95%)

Por otro lado, el planteamiento de modelos de propagación que hicieran consideración de las convergencias de vías ya había sido propuesto por Ferreira¹⁶, para microceldas. Sin embargo, llevar a cabo un replanteamiento de la formulación UTD para modificar un modelo planteado y adaptarlo a una herramienta de planificación con manejo de datos tipo *Raster* y generar un alto

¹⁴ COST 231 Final Report, "Digital mobile radio: COST 231 view on the evolution towards 3rd generation systems". Editors: Damosso, E. and Correia L.M., European Commission – COST Telecommunications, Brussels, Belgium, 1998.

¹⁵ Lorenzo Rubio, Narcis Cardona, Santiago Flores, Juan Reig and Leandro Juan-Llber. The Use of Semi-deterministic Propagation Models for the Prediction of the Short-term Fading Statistics in Mobile Channels.

¹⁶ Claro, A.R., Ferreira, J.M. and Correia, L.M., "Assessment of a propagation model for crossroads in micro-cells", in Proceedings of VTC'99 Fall-50th IEEE Vehicular Technology Conference, Amsterdam, The Netherlands, Sep. 1999.

nivel de predicción en dichos entornos, sólo es propuesto y desarrollado en la presente investigación¹⁷.

3.2.1.2 Modelos Path loss para entornos indoor

Aunque el tema de ésta investigación se desarrolla bajo entornos *outdoors*, se hará una breve descripción de la propagación *indoors* considerando que los canales de sistemas inalámbricos tan comunes e importantes actualmente como las redes LANs, están descritos por ellos.

Modelar las pérdidas por propagación en espacios cerrados como los interiores de las construcciones, se vuelve una tarea complicada debido a la gran variedad de mecanismos de propagación que interactúan en el sistema. Un ejemplo de modelo lo plantea Keenan¹⁸ mediante la formulación:

$$L = L_1 + 20 \log r + n_f a_f + n_w a_w \quad (\text{dB}) \quad (3.23)$$

Donde L_1 son las pérdidas a un metro de distancia de la BS, a_f y a_w so factores de atenuación que dependen de los materiales de la construcción y el grosor de la pared. Una aproximación similar es reportada en la recomendación ITU-R P.1238¹⁹.

En la practica cuando la atenuación de una pared se incrementa, la contribución de potencia recibida a través de ésta pared decrece con respecto a las contribuciones de potencia recibida a través de otras rutas así como

¹⁷ Carreño Y. I. Desarrollo del modelo de propagación Andino UIS. I Congreso de Ingeniería de Sistema y Electrónica, "Nuevas Tendencias en la globalización Tecnológica", *Universitaria de Investigación y Desarrollo, Bucaramanga, Octubre 2004*.

¹⁸ Keenan, J.L. and Motley, A.J., "Radio coverage in buildings", *British telecom technology Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 19-24, Jan. 1990.

¹⁹ International Telecommunication Union, "ITU-R recommendation P.1238: propagation data and prediction models for the planning of indoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz, Geneva, 1997.

puertas abiertas, ventanas, ductos de ventilaciones. Este comportamiento es modelado en el reporte final del COST259²⁰ por un término no lineal L_n ,

$$L_n = L_w n^{((n_w+2)/(n_w+1)-b)_w} \quad (\text{dB}) \quad (3.24)$$

donde L_w son las pérdidas en la pared.

3.2.1.3 Propagación dentro de edificios

Diferentes modelos han sido propuestos para la estimación de las pérdidas por penetración dentro de edificios; dichos modelos incluyen propiedades de los edificios, así como el área de los pisos, número de paredes, número de cuartos y también transmisiones de condición local como por ejemplo el ángulo de iluminación (área efectiva de irradiación)²¹. En el reporte final del COST 231 fue presentado un modelo que incluía ángulos de iluminación y pérdidas por transmisión a través de paredes para los casos de LOS (Line of see) o NLOS (Not line of see). También Gahleitner²² desarrolla un simple modelo empírico para describir la penetración de las ondas (de 950 a 1800MHz) dentro de construcciones urbanas en microceldas.

3.2.2 Desvanecimiento a gran escala (Large scale fading)

El término desvanecimiento a gran escala hace referencia a las variaciones de la amplitud promedio o de la potencia promedio de la señal recibida, cuando es utilizado como medio de transmisión un canal multitrayectoria con variaciones en espacio-tiempo. La amplitud o potencia promedio permanecen aproximadamente constante dentro de un cierto intervalo de tiempo o espacio;

²⁰ COST 259 Final Report, "Wireless Flexible Personalised Communications, COST 259 European Co-operation in Mobile Radio Research". Editor: Correia, L.M., ISBN: 0-471-49836, J. Wiley, NY, U.S.A., 2001.

²¹ Barry P.J. and A.G. Williamson, "Modelling of UHF radio wave signals within externally illuminated multi-story buildings", J. IERE, 57, (6), (supplement), pp. S231-S240, 1987.

²² Gahleitner, R. and Bonek, E., "Radio wave penetration into urban buildings in small cells and microcells", 44th IEEE Vehicular Technology Conference, vol. 2, pp. 887 –891, 1994.

éste intervalo ha sido determinado alrededor de unos cientos de longitud de onda para el radio canal en entornos outdoor.

3.2.2.1 Modelado en banda angosta (Narrowband modelling)

Para mediciones en banda angosta se ha observado que la variabilidad de la amplitud promedio local (o potencia promedio) tiende a ser una distribución log-normal (o distribución Gaussiana)²³. Esta es generalmente, una manera aceptable de caracterizar el desvanecimiento a gran escala; la media y la desviación estándar son determinadas a partir de los datos tomados en el entorno particular.

3.2.2.2 Modelado en banda ancha (Wideband modelling)

El canal banda ancha es caracterizado por la variación espacio-tiempo de la respuesta al impulso del canal (CIR, Channel Impulse Request):

$$h(t, \tau) = \sum_i a_i(t) e^{j\phi_i(t)} \delta(\tau - \tau_i) \quad (3.25)$$

La ecuación (3.26) representa la dependencia en el tiempo de la amplitud y fase de la i -enésima componente de multitrayectoria i , que llega en un tiempo de retraso τ_i sumado al tiempo particular de llegada t . La potencia promedio puede ser obtenida integrando el cuadrado de los CIRs medido sobre el área local. Contrario al modelado de canal banda angosta, un modelo de canal banda ancha está compuesto de un gran número de componentes de frecuencias que pueden desvanecerse independientemente (desvanecimiento selectivo de frecuencia)*. En cada uno de los casos, el CIR consistirá de una serie de rutas recibidas en diferentes intervalos de tiempo. Cada una de estas

²³ Chrysantou, C. and Bertoni, H.L., "Variability of sector averaged signals for UHF propagation in cities, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 39(4), pp. 352-58, 1990.

rutas son tratadas como canales de banda angosta para caracterizar el desvanecimiento de gran escala a través de una distribución log-normal²⁴.

3.2.3 Desvanecimiento a pequeña escala (Small scale fading)

El término desvanecimiento a pequeña escala hace referencia a las variaciones rápidas de amplitud en la señal recibida cuando un MS se mueve sobre distancias cortas (en el orden de longitudes de onda) en un canal multitrayectoria variable en tiempo y espacio. Sin embargo, la amplitud o potencia promedio permanece aproximadamente constante sobre esas cortas distancias²⁵.

3.2.3.1 Modelado en banda angosta (Narrowband modelling)

La caracterización más común del desvanecimiento a pequeña escala es

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad r \geq 0 \quad (3.26)$$

La ecuación (3.27) representa la distribución de amplitud de la suma r de un gran número de vectores (trayectorias) con amplitudes del mismo orden de la magnitud de la señal y fases uniformemente distribuidas²⁶. La fase resultante es también uniformemente distribuida en el intervalo $[0, 2\pi]$. El parámetro σ representa el valor rms de la señal recibida. Mediciones indoors en 5.3GHz han demostrado la distribución Rayleigh que posee el desvanecimiento de las

²⁴ Zwick, T., Fischer, C., and Wiesbeck, W., "A statistical channel model for indoor environments including angle of arrival", in Proceedings of VTC'98 - 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, Canada, May 1998.

²⁵ Parson, J.D. and Bajwa, A.S., "Wideband characterisation of fading mobile radio channels", IEE proceedings, vol. 129, Part F, no. 2, pp.95-101, Apr. 1982. mediante la distribución Rayleigh.

* GARCÍA, A. P., **Sistemas MIMO como Alternativa para el Control del Efecto Multitrayectoria y de la Interferencia Co-Canal en Sistemas de Radio Móvil Satelital y Terrestre**, Revista de la Facultad de Ingeniería "Sistemas y Telemática", Universidad ICESI. Vol. 2, No.1 (Dic. 2004); p. 57-94. ISSN 1692-5238.

²⁶ William C. Y. Lee, *Mobile Communications Engineering, Cap. 2 Statistical Communications Theory* pag. 59-100 USA: McGraw-Hill Book Company, 1997.

amplitudes en las situaciones de LOS y NLOS²⁷. Sin embargo, las investigaciones presentadas por Kattenbach²⁸ ha demostrado que en ciertas situaciones, la distribución Rice puede dar una mejor caracterización con los datos medidos.

La distribución Rice describe la distribución de amplitud de la suma r de un vector dominante (trayectoria con mayor aporte) y número de vectores no relacionados con amplitudes del mismo orden de magnitud y fase uniformemente distribuida. La distribución Rice es dada por:

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} I_0\left(\frac{r \cdot \rho}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{r^2 + \rho^2}{2\sigma^2}} \quad r \geq 0 \quad (3.27)$$

Donde I_0 es la función Bessel modificada de primer orden. El parámetro ρ denota la amplitud de la componente dominante. La distribución Rice contiene la distribución Rayleigh como un caso especial; si se elimina la componente dominante de la distribución Rice, ésta queda en la forma de la distribución Rayleigh.

La distribución Rayleigh es también un caso especial de la distribución Nakagami (con $m = 1$)²⁹. Para un valor muy grande del parámetro m la distribución Nakagami es aproximadamente similar a la distribución Rice. La función de densidad de probabilidad es dada por:

$$f(r) = \frac{2m^m r^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} e^{-(m/\Omega)r^2} \quad (3.28)$$

²⁷ Kivinen, J. and Vainikainen, P., "Analysis of wideband indoor propagation measurements at 5.3 GHz", COST 259, td(98)067, Bradford, UK, Apr. 1998.

²⁸ Kattenbach, R. and Englert, T., "Wideband statistical modelling of indoor radio channels based on the Time-variant Transfer Function", COST 259, TD(97)071, Lisbon, Portugal, Sep. 1997.

²⁹ Nakagami, M., "The m -distribution – a general formula of intensity distribution of rapid fading". In Hoffman, W.C. (editor): "Statistical methods of radio wave propagation", Pergamon Press, 1960.

Donde $\Gamma(m)$ es la función Gamma, $\Omega = E\{r^2\}$ y m es la figura de desvanecimiento definida como:

$$m = \frac{\Omega^2}{E[(r^2 - \Omega^2)^2]}, \quad m \geq 1/2 \quad (3.29)$$

Físicamente hablando, la m -distribución Nakagami es obtenida cuando se suma muchas componentes de vectores (trayectorias), los cuales no son únicamente aleatorios en fase si no también en longitud. Es por lo tanto un modelo más general que el Rayleigh. La distribución Nakagami presenta una desventaja cuando es utilizada en análisis combinados de múltiples señales (i.e. diversidad, receptores Rake en sistemas CDMA o WCDMA, antenas adaptativas, sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas-MIMO, etc.); en estas situaciones se prefiere utilizar la distribución Rice.

Un ejemplo claro de un modelo desarrollado a partir de análisis estadísticos y campañas de medidas es el ya mencionado modelo Univalencia de la Universidad Politécnica de Valencia (España). En este modelo, la distribución Nakagami es utilizada para describir el *short-term fading* o *fast fading* en entornos urbanos. Sin embargo para llevar a cabo la implementación de dicho modelo en una herramienta de planificación, es necesario contar con una base de datos con propiedades físicas y eléctricas de los materiales de los edificios.

3.2.3.2 Modelado en banda ancha (Wideband modelling)

El modelado en banda ancha es comúnmente analizado mediante la distribución Rayleigh con fase uniformemente distribuida, excepto para los casos LOS en donde la distribución Rice es utilizada. Otra manera de modelar los canales en banda ancha es mediante la m -distribución Nakagami. Estos modelos consideran entre otras cosas, los denominados *Power Delay Profile* (PDF) y el fenómeno *Doppler Spectrum*^{**}. La validación de algunos modelos en

diferentes escenarios son tratados en Alayon-Glazounov³⁰ a frecuencias de 1.9GHz y en Medbo³¹ en la banda de 5GHz.

3.3 MODELADO DETERMINÍSTICO

Los modelos determinísticos de propagación le dan un tratamiento netamente físico a la descripción de los fenómenos implicados en la radio propagación. Son muy apropiados en los casos en que la planeación de las redes requieren un gran nivel de aproximación. Además de proveer análisis de banda ancha y banda angosta, incluye análisis de delay-spread y angular-spread, los cuales son muy útiles en el diseño de modernos sistemas digitales inalámbricos que incluyen antenas inteligentes. Sin embargo, para llevar a cabo la predicción a través de éste tipos de modelos, se debe contar con extensa bases de datos para escenarios específicos, como por ejemplo bases de datos topográficas y constantes de materiales.

3.3.1 Modelado de los fenómenos de propagación y sus efectos

Los principales métodos determinísticos son divididos en dos grandes grupos: *métodos de onda completa* (para aplicaciones de bajas frecuencias) y *métodos Asintóticos* (para aplicaciones de alta frecuencia).

Los siguientes métodos pertenecen al primer grupo:

3.3.1.1 Ecuaciones Integrales

³⁰ Alayon-Glazounov, A. and Berg, J-E., "Statistical analysis of measured short-term impulse response functions of 1.88 GHz radio channels in Stockholm with corresponding channel model", in Proceedings of VTC'99 Fall-50th IEEE Vehicular Technology Conference, Amsterdam, The Netherlands, Sep. 1999.

³¹ Medbo, J., Andersson, H., Scramm, P., Asplund, H. and Berg, J.-E., "Channel models for HIPERLAN/2 in different indoor scenarios", COST 259, TD(98)070, Bradford, UK, Apr. 1998.

** GARCÍA, A. P., **Sistemas MIMO como Alternativa para el Control del Efecto Multitrayectoria y de la Interferencia Co-Canal en Sistemas de Radio Móvil Satelital y Terrestre**, Revista de la Facultad de Ingeniería "Sistemas y Telemática", Universidad ICESI. Vol. 2, No.1 (Dic. 2004); p. 57-94. ISSN 1692-5238.

Las ecuaciones integrales son adecuadas para la descripción de la propagación de las ondas alrededor de cuerpos de formas irregulares. El llamado teorema de equivalencia es usado para reemplazar el cuerpo irregular por varios volúmenes con características eléctricas conocidas y semejantes al cuerpo irregular. Generalmente, esas dos ecuaciones son acopladas, pero en algunos casos especiales (conductores perfectos) pueden ser desacopladas, resultando en una ecuación integral de campo eléctrico y una ecuación integral de campo magnético. Después de una adecuada discretización del área de integración, dichas ecuaciones integrales son reducidas a ecuaciones de matriciales, las cuales muchas veces son extensas, siendo esto una de las principales desventajas de éste método. El más común de los procedimientos numéricos utilizados para resolver ecuaciones integrales, es el *método de momentos* (MoM). Hay muchas técnicas para improvisar la eficiencia de éste método. Una de ellas es el método localización de la matriz de impedancia, el cual reemplaza la matriz impedancia por una matriz dispersa N-diagonal³². Otro procedimiento aproximado consiste en reemplazar la matriz impedancia por una de forma triangular esparcida (esto es despreciando la dispersión de fondo)³³. Independientemente del método escogido, el tiempo de cómputo de éstos procedimientos representan una desventaja adicional al ser considerable.

3.3.1.2 Ecuaciones diferenciales

Hay muchas formas diferentes de éste tipo de formulación, de entre ellas sobresale los tres métodos siguientes: método de diferencias finitas, método de elementos finitos y método de ecuación parabólica.

El método de diferencias finitas discretiza el dominio computacional en intervalos y calcula los campos en cada punto del intervalo con las ecuaciones

³² Canning, F.X., "The impedance matrix localisation method for moment method calculations", IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 32, pp. 18-30, Oct. 1990.

³³ Hviid, J.T., Andersen, J.B., Tofgaard, J. and Bojer, J., "Terrainbased propagation model for rural area – an integral equation approach", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 43, pp. 41-46, Jan. 1995.

gobernantes (las ecuaciones de Maxwell o las ecuaciones de onda). El método más popular es la diferencia finita en el tiempo (FDTD), el cual es adecuado para aplicaciones de banda ancha. Sus resultados son una matriz esparcida, la cual hace que el método sea eficiente (para una cantidad de intervalos no muy grande)

3.3.2 Métodos asintóticos

Existen dos principales métodos asintóticos para aplicaciones que implican manejo de frecuencias altas, los físicos ópticos y físicos geométricos.

Los físicos ópticos (PO) son métodos que están relacionados con el método de ecuación parabólica. Suministra la distribución de campo y calcula campo lejano por un procedimiento de doble integración. En algunos casos ésta integral puede ser solucionada analíticamente, pero en la mayoría de los casos, debe ser resuelta numéricamente.

La geometría óptica (GO) es otra técnica popular para aplicaciones de altas frecuencias, que consiste en reemplazar la onda por un conjunto de rayos. Estos rayos son de tres tipos: directo, reflejado y refractado. El campo en el punto de observación es una superposición de los campos asociados con todos los rayos. Sin embargo, en la región de sombra los campos no pueden ser explicados únicamente por estos tres tipos de rayos, se debe también tener en cuenta los rayos difractados, los cuales son descritos por la teoría geométrica de difracción (GTD), sin embargo ésta teoría no es válida para las regiones de frontera de los elementos y es necesario utilizar una teoría general conocida como teoría uniforme de la difracción (UTD) a la cual, se hace referencia en el siguiente capítulo. Las soluciones del clásico problema de difracción en esquinas, es resuelto mediante aproximaciones de UTD en términos de la integral de Fresnel.

La mayoría de los métodos de trazado de rayos (ray-tracing) que utilizan las herramientas de predicción de propagación *indoor* y *outdoor*, están basados en UTD³⁴.

3.4 MODELAMIENTO SEMI-DETERMINISTICO

Aunque los modelos determinísticos describen de manera muy efectiva los mecanismos de propagación, en la mayoría de los casos existen ciertos tipos de entornos que poseen características tan complejas que surge la necesidad de concatenar los procedimientos teóricos con los datos muestrales tomados directamente del entorno para lograr de alguna manera aproximar la predicción.

Los modelos semideterminísticos son elegidos cuando el diseño de la interfaz radio de un sistema de comunicación móvil y la elección de los parámetros del radio enlace para el uso de entornos tanto outdoors como indoors, requieren de una completa descripción de los campos electromagnéticos. En un escenario microcelular *outdoor*, los modelos semideterminísticos consideran entre otras cosas la dispersión debido a los árboles ubicados en las cercanías de las calles. Mientras que en los escenarios picocelulares *indoor*, una completa descripción de los campos electromagnéticos es difícil de obtener, debido a que a menudo las propiedades del entorno no son bien definidas o no siempre están disponibles. Sobre éste tema hay una gran cantidad de literatura disponible, algunos métodos describen totalmente los campos electromagnéticos en un cuarto, así como el ray-tracing³⁵, y los métodos de onda completa.

³⁴ Torres, R.P., Valle, L., Domingo, M. and Loredó, S., "CINDOOR: An engineering tool for planning and design of wireless systems in enclosed spaces", IEEE Antennas and Propagation Mag., vol. 41, pp. 11-22, Aug. 1999.

³⁵ Valenzuela, R.A., "Ray tracing prediction of indoor radio propagation", in Proceedings of PIMRC '94, pp. 140-143, The Hague, The Netherlands, 1994.

El modelo desarrollado en la presente investigación, es considerado perteneciente a ésta clasificación, es decir, un modelo de propagación semideterminístico.

CAPITULO 4

TEORÍA SOBRE DIFRACCIÓN POR FILOS Y ESQUINAS

En éste capítulo se presenta el contexto teórico de uno de los fenómenos presentes en los mecanismos de propagación, *la difracción*. Estos conceptos serán útiles al momento de presentar los análisis sobre el comportamiento de los campos en entornos particulares como la convergencia de vías, factor correspondiente a uno de las consideraciones del modelo Andino UIS®.

Para describir los efectos de difracción causados por filos y esquinas de superficies, se emplea matemática simple a través de la aproximación de Kirchhoff-Huygens³⁶. La aproximación escalar de Kirchhoff para la amplitud compleja del campo eléctrico E , o el campo magnético H , en un punto receptor (x, y, z) con $x > 0$, debido a una fuente ubicada en la región $x < 0$, como se muestra en la ilustración 4.1, puede ser expresada en función de una integral sobre el plano $x = 0$, de la siguiente forma:

$$E_z(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Lambda(\alpha, \alpha') E^{inc}(0, y', z') \frac{jke^{-jkr_R}}{4\pi r_R} dy' dz'$$
$$H_z(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Lambda(\alpha, \alpha') H^{inc}(0, y', z') \frac{jke^{-jkr_R}}{4\pi r_R} dy' dz' \quad (4.1)$$

Aquí r_R es la distancia de un punto $(0, y', z')$ de la segunda fuente ubicada en el plano $x = 0$ al punto receptor (x, y, z) .

$$\Lambda(\alpha, \alpha') = \cos \alpha + \cos \alpha' \quad (4.2)$$

E^{inc} y H^{inc} son los campos debido a las fuentes actuales, los cuales en este caso

³⁶ Henry L. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, USA: Prentice Hall PTR, 2000.

corresponden a la fuente ubicada en el plano $x = 0$. Se puede pensar en la formulación (4.1) como el producto entre las ondas esféricas dependientes de la distancia, originadas por las fuentes secundarias y una función patrón $\Lambda(\alpha, \alpha')$. En formulaciones vectoriales rigurosas, $\Lambda(\alpha, \alpha')$ representa al operador diferencial que también describe la polarización del campo difractado.

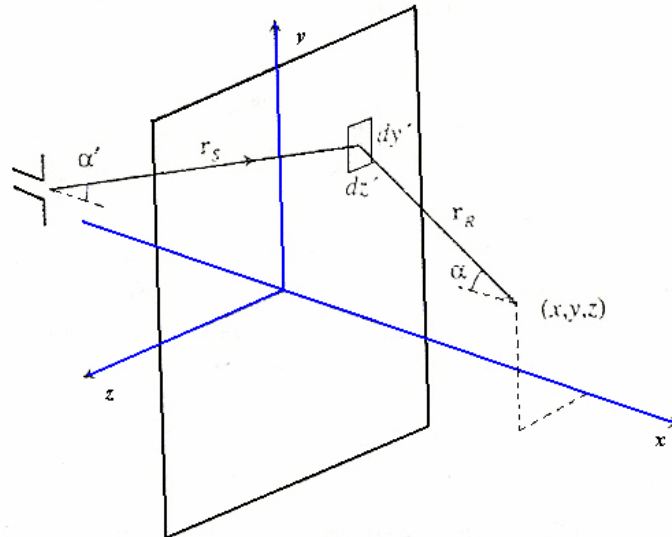


Ilustración 4.1 El campo que llega al punto receptor corresponde a la suma de las contribuciones generadas por las fuentes equivalentes de un plano intermedio.

Integrando las contribuciones de las señales esféricas sobre la distribución de las fuentes secundarias dadas, se obtiene el campo total en el punto receptor.

En las siguientes secciones se muestra como a partir de la ecuación (4.1) se logra establecer las formulaciones de la Teoría Geométrica de Difracción (GTD) y la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD), siendo esta última la teoría empleada en la presente investigación. Sin embargo, será presentado antes un breve análisis referentes a las zonas de Fresnel y sus implicaciones en el diseño de redes inalámbricas.

4.1 NATURALEZA LOCAL DE LA PROPAGACIÓN

Considere una onda esférica propagándose desde una fuente transmisora hasta un punto receptor dado. Es útil determinar la región local de espacio a

través del cual los campos tienden a propagarse desde el transmisor hasta el receptor, una manera de hacerlo es haciendo uso del concepto *shadowing* que se presenta cuando una pantalla absorbente³⁷ con un agujero centrado, es ubicada entre la fuente y el punto receptor. Mediante el ajuste del tamaño, forma y localización del agujero, se minimiza la distorsión de los campos en el punto receptor y se determina la región a través de la cual los campos se propagan.

Básicamente lo que se busca es determinar la relación entre el tamaño del agujero y la distorsión de los campos al pasar a través de éste.

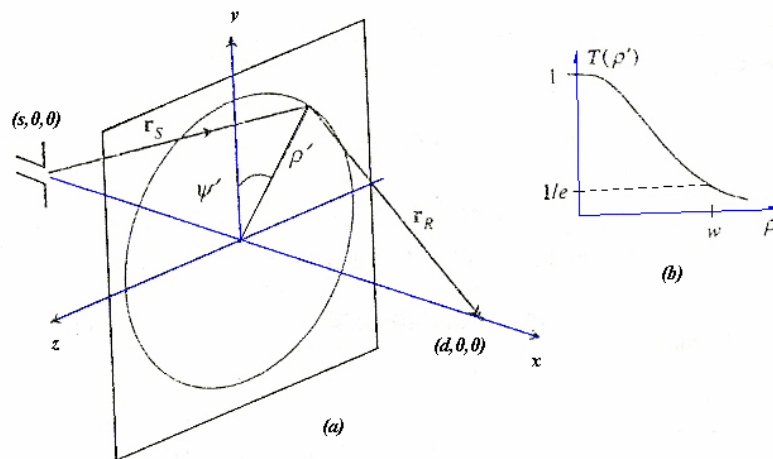


Ilustración 4.2 a-b El agujero circular en (a) es centrado con respecto a la línea de vista entre el transmisor y receptor y es usado para hallar el tamaño de la región a través de la cual las ondas se propagan, asumiendo que su coeficiente de transmisión (b) tiene una variación continua con la distancia radial.

Supóngase una fuente ubicada en el punto $(-s, 0, 0)$ sobre el eje negativo de x y un punto receptor ubicado en $(d, 0, 0)$ sobre el eje positivo de x . La pantalla absorbente es ubicada en el plano $x = 0$ con un agujero circular centrado con respecto al eje x , como se muestra en la ilustración 4.2a.

Una pantalla con un agujero circular es matemáticamente equivalente a asignar un coeficiente de transmisión $T(\rho')$ al plano $x = 0$, donde ρ' es la distancia radial:

³⁷ Pantalla plana, perfectamente conductora e infinitamente delgada y opaca con omisión de su estructura microscópica.

$$\rho' = \sqrt{(y')^2 + (z')^2} \quad (4.3)$$

Dentro del agujero $T(\rho') = 1$ y fuera de él, $T(\rho')$ se hace cero a medida que ρ' incrementa. Si $T(\rho')$ cambia abruptamente de región (de 1 a 0), los efectos de difracción ocurridos, podrían confundirse en su interpretación. Para evitar esto, se utiliza una variación continua de $T(\rho')$, como por ejemplo una función Gaussiana.

$$T(\rho') = e^{-\frac{(\rho')^2}{w^2}} \quad (4.4)$$

lo cual conduce a una simple expresión matemática. La función Gaussiana es mostrada en la ilustración 4.2b, donde $w = \frac{1}{e}$ representa el radio del agujero.

4.1.1 Evaluación de la distorsión de campos.

En la zona de campo lejano de cualquier tipo de antena, las ondas radiadas son esféricas con campos eléctricos y magnéticos dados por:

$$\begin{aligned} \bar{E} &= ZI f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \bar{a}_E \\ \bar{H} &= \frac{1}{\eta} \bar{a}_r \times \bar{E} \end{aligned} \quad (4.5)$$

r es la distancia radial a la antena, $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ es el número de onda, de manera que la fase kr en (4.5) es constante sobre esferas centrada en la antena. η es la impedancia de onda (≈ 377) y relaciona el campo eléctrico con el campo magnético. I es la corriente terminal en la antena, Z es una constante en unidades de ohms y $f(\theta, \phi)$ describe la variación de los campos con la dirección de propagación (θ, ϕ) (son básicamente parámetros relacionados con el transmisor).

El campo eléctrico incidente sobre la pantalla ubicada en el plano $x = 0$ es:

$$E(0, y', z') = ZIf(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_s}}{r_s} \quad (4.6)$$

Donde $r_s = \sqrt{s^2 + (\rho')^2}$ es la distancia del transmisor a un punto del plano $x = 0$. La fuente secundaria de campo E^{inc} que se encuentra a la derecha de la pantalla, está dada por el producto de (4.6) y la función de transmisión (4.4). El campo $E(d, 0, 0)$ es hallado por la integral de Kirchhoff-Huygens (4.1) con E^{inc} siendo el producto de (4.4) y (4.6). Debido al agujero centrado sobre el eje x , α y α' serán pequeños y por (4.2) $\Lambda(\alpha, \alpha') \approx 2$. Así, usando las variables cilíndricas (ρ', ψ') que se muestran en la ilustración 4.2a se obtiene:

$$E(d, 0, 0) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} ZIf(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_s}}{r_s} e^{-\frac{(\rho')^2}{w^2}} \frac{jke^{-jkr_R}}{2\pi r_R} d\psi' \rho' d\rho' \quad (4.7)$$

donde $r_R = \sqrt{d^2 + (\rho')^2}$ es la distancia del punto de integración al punto del receptor.

Para evaluar la integral de (4.7), hay que reconocer que la función Gaussiana limita la contribución del valor ρ' a valores cercanos a cero. Se puede por tanto, aproximar r_R y r_s con:

$$\begin{aligned} r_R &= \sqrt{d^2 + (\rho')^2} \approx d + \frac{(\rho')^2}{2d} \\ r_s &= \sqrt{s^2 + (\rho')^2} \approx s + \frac{(\rho')^2}{2s} \end{aligned} \quad (4.8)$$

En el denominador de (4.7) el segundo término de (4.8), causará poca variación en la integral y se podrá por tanto utilizar $r_R = d$ y $r_s = s$. Debido a que la variación de $f(\theta, \phi)$ sobre el agujero será pequeña, se podrá reemplazar por su valor en el centro del agujero. En este caso la integral es independiente de ψ' , de manera que la integración sobre ψ' dará 2π . Utilizando las anteriores aproximaciones, (4.7) llega a ser:

$$E(d,0,0) = ZIf(\theta, \phi) \frac{jke^{-jk(s+d)}}{sd} \int_0^\infty \exp\left\{-\left[\frac{1}{w^2} + j\frac{k}{2}\left(\frac{1}{s} + \frac{1}{d}\right)\right](\rho')^2\right\} \rho' d\rho' \quad (4.9)$$

La integración en (4.9) se resuelve en:

$$E(d,0,0) = \left[ZIf(\theta, \phi) \frac{jke^{-jk(s+d)}}{sd} \right] \frac{1}{1 - j\frac{2sd}{kw^2(s+d)}} \quad (4.10)$$

El primer término en (4.10) corresponde al campo que debería llegar al punto receptor si la pantalla no estuviera ubicada en el plano $x=0$. El siguiente término corresponde a la distorsión de los campos debido a la presencia de la pantalla, la cual es pequeña si el radio w del agujero es grande. Si se define el error ε por la expresión:

$$\varepsilon \equiv \frac{2sd}{kw^2(s+d)} = \frac{\lambda sd}{\pi w^2(s+d)} \quad (4.11)$$

se tendrá que para un ε pequeño, el término de distorsión en (4.9) es aproximadamente $1 + j\varepsilon$, esto quiere decir que la fase de los campos es distorsionada por $\tan^{-1} \varepsilon$ y la amplitud por $\sqrt{1 + \varepsilon^2} \approx 1 + \frac{\varepsilon^2}{2}$. Por ejemplo, si $\varepsilon \approx 0.1$ la fase sería distorsionada en alrededor de 18° y la amplitud en 0.5%.

Para un error fijo ε , se podría determinar el radio w del agujero de la región local a través del cual los campos se propagan, como:

$$w = \sqrt{\frac{\lambda sd}{\pi \varepsilon (s+d)}} \quad (4.12)$$

En la siguiente sección se muestra las implicaciones de la ecuación (4.12) en el diseño de sistemas inalámbricos.

4.1.2 Interpretación de la región local en términos de las zonas de Fresnel.

Las zonas de Fresnel son elipsoides de revolución alrededor de la línea directa entre transmisor y receptor, los puntos de ubicación, tanto del transmisor como del receptor, representan los focos de los elipsoides, esto se puede apreciar en la ilustración 4.3.

Para la n -ésima zona de Fresnel, la distancia $r_s + r_R$ es $n\lambda/2$ mayor que la distancia $s + d$, esto es:

$$(r_s + r_R) - (s + d) = n\frac{\lambda}{2} \quad (4.13)$$

w_{Fn} es el radio de la zona de Fresnel., si $s + d \gg \lambda$, r_R y r_s pueden ser aproximados por (4.8) con ρ' remplazado por w_{Fn} . Sustituyendo ésta expresión en (4.13) y solucionando para w_{Fn} , se obtiene:

$$w_{Fn} = \sqrt{n\frac{\lambda sd}{(s + d)}} \quad (4.14)$$

Comparando (4.12) y (4.14) se observa que, si w_{Fn} es tomado como el radio del agujero en la pantalla, la distorsión del campo será $\varepsilon = \frac{1}{n\pi}$. Para $n = 1$, el error de fase es de alrededor de 60° pero el error en la amplitud es únicamente alrededor del 10%. El resultado anterior indica que la propagación de la onda desde la fuente transmisora hasta el punto receptor es un *fenómeno localizado*, con la región local dada por las zonas de Fresnel.

Obstáculos, tales como la superficie terrestre, edificios o construcciones que están localizados fuera de las zonas de Fresnel, pueden introducir contribuciones adicionales de reflexiones o dispersiones, al campo total en el punto receptor, pero causa únicamente una baja distorsión a la señal original, sin embargo, obstáculos u objetos ubicados dentro de la zona de Fresnel, especialmente dentro de la primera zona ($n = 1$), dará como resultado una significativa distorsión de la señal. Un criterio en el diseño de enlaces

microondas punto a punto, requiere que la zona de Fresnel esté por encima de la superficie terrestre y que no existan obstáculos en las zonas de Fresnel, principalmente, en la primera zona.

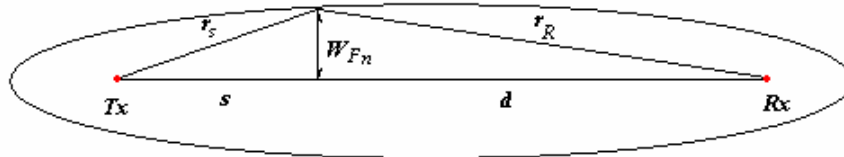


Ilustración 4.3 La zona de Fresnel es la revolución de una elipse con el transmisor y receptor como focos.

Por ejemplo, considérese la figura 4.4 en donde se representa un punto cualquiera de transmisión Tx y un punto de recepción Rx . En la figura 4.5 se registra el cálculo de las zonas de Fresnel a través de una herramienta de planificación. Para éste caso, existen cuatro obstáculos (edificios) a lo largo del perfil. El último de ellos interfiere totalmente, tanto la primera como la segunda zona de Fresnel. Eso significa que el nivel de la señal en dicho punto será tan débil que incluso, puede no existir comunicación.

Si se asume que $s \approx d$ entonces la ecuación (4.14) toma la forma:

$$w_{Fn} = \sqrt{n \frac{\lambda}{2}}$$

si el sistema opera a una frecuencia de 800MHz, la longitud de onda sería

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3}{8}. \text{ Para la primera zona de Fresnel } (n=1), \text{ se tendría } w_{Fn} \approx 43.3cm,$$

esto quiere decir que el último obstáculo debería estar como mínimo a una distancia de 1/2 metro de la línea de vista entre Tx y Rx . Al menos para asegurar una buena comunicación en dicho punto. Como solución se tendría por ejemplo, aumentar la altura del elemento transmisor o cambiar la posición de la altura del transmisor.

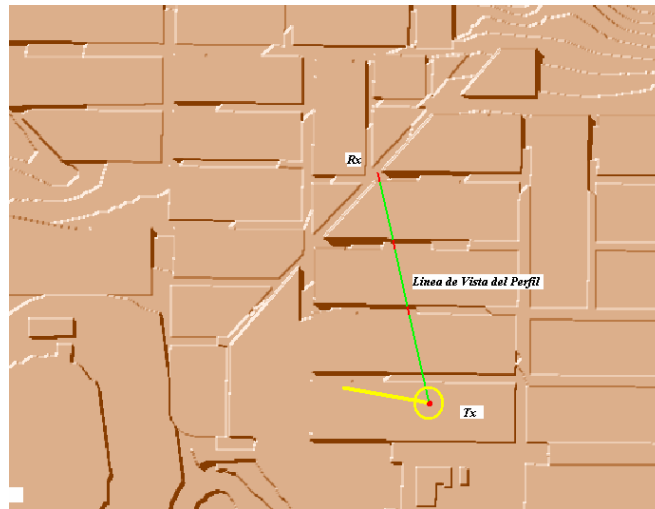


Ilustración 4.4 Ejemplo de cálculo de perfil.

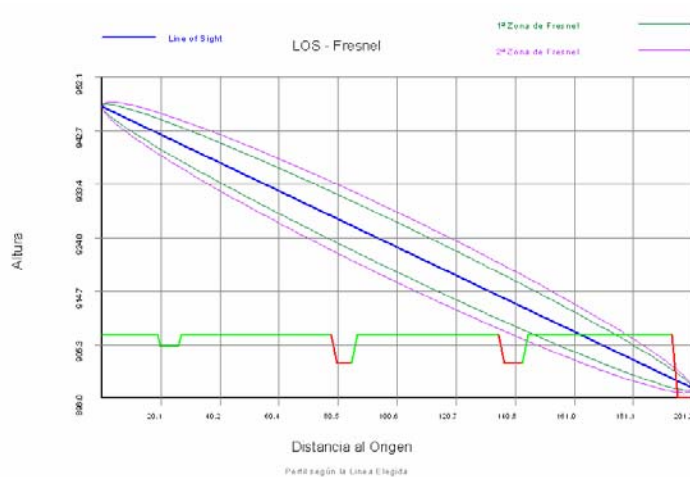


Ilustración 4.5 Cálculo de la 1^{ra} y 2^{da} zona de Fresnel de un perfil.

4.2 DIFRACCION DE UNA ONDA PLANA DEBIDO A MEDIA PANTALLA ABSORBENTE.

El problema de difracción de una onda plana debido a un filo, sirve como prototipo para muchos otros problemas de difracción. Como se observa en la ilustración 4.6, una onda plana es generada por una fuente distante ubicada en el lado izquierdo del plano $x = 0$, la mitad inferior de dicho plano contiene una pantalla absorbente.

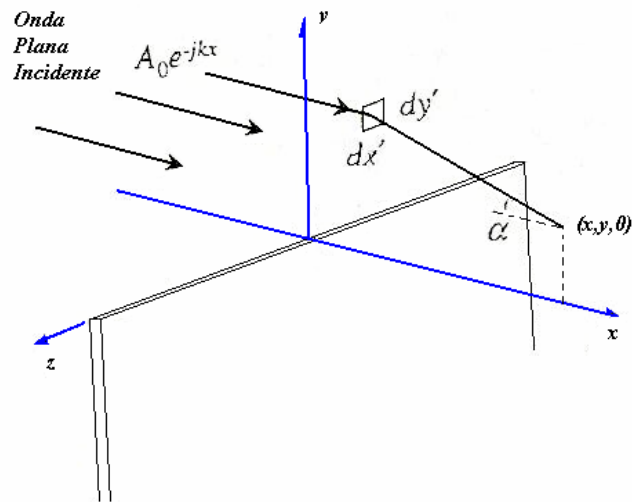


Ilustración 4.6 El campo transmitido a través de media pantalla absorbente.

Si la onda plana se propaga a lo largo del eje x , entonces $\alpha'=0$ y la componente z del campo incidente, tendrá una dependencia espacial dada por:

$$E_z^{inc} = E_0 e^{-jkx}$$

$$H_z^{inc} = H_0 e^{-jkx} \quad (4.15)$$

Los campos difractados que pasan a través de la pantalla pueden determinarse mediante la formulación (4.1). Se consideran las ondas planas incidentes sobre la región $y > 0$ y se asume que existe atenuación de los campos en la región $y < 0$.

Por simplicidad, los puntos receptores son considerados en el plano $z = 0$. Bajo estas consideraciones, el campo difractado que pasa a través del plano, puede ser expresado por:

$$E_z(x, y, z) = E_0 \frac{jk}{4\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jkr_R}}{r_R} dz' dy'$$

$$H_z(x, y, z) = H_0 \frac{jk}{4\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jkr_R}}{r_R} dz' dy' \quad (4.16)$$

Donde la distancia desde el punto de integración hasta el punto receptor, es dado por:

$$r_R = \sqrt{x^2 + (y - y')^2 + (z')^2} \quad (4.17)$$

Para integrar en (4.15), se despeja z' , para ello se tiene en cuenta de la sección 4.1, que la contribución principal a la integral es para una región de z' dada por la zona de Fresnel, la cual es pequeña comparada con x para $x \gg \lambda$. El centro de esta región es un punto de fase estacionaria donde la derivada del exponente kr_R con respecto a z' se hace cero.

Sin embargo, r_R puede variar para unas pocas longitudes de onda, así que en el exponente, es necesario expandir r_R a un segundo orden como:

$$r_R = \rho_R + \frac{(z')^2}{2\rho_R} \quad (4.18)$$

Donde:

$$\rho_R = \sqrt{x^2 + (y - y')^2} \quad (4.19)$$

Usando la anterior aproximación, la integración sobre z' en (4.15) se reduce a:

$$\int_{-\infty}^{\infty} (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jkr_R}}{r_R} dz' \approx (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\rho_R} \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{-jk(z')^2}{2\rho_R}} dz' \quad (4.20)$$

La integración sobre el término de la derecha de (4.19), puede ser evaluado in forma cerrada usando la sustitución $u = z' e^{j\pi/4} \sqrt{k/2\rho_R}$, dando como resultado:

$$\int_{-\infty}^{\infty} (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jkr_R}}{r_R} dz' \approx (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\rho_R} e^{-j\pi/4} \sqrt{\frac{2\pi\rho_R}{k}} \quad (4.21)$$

Sustituyendo (4.20) en (4.15), se obtiene:

$$E_z(x, y, z) = E_0 \frac{e^{j\pi/4}}{2} \sqrt{\frac{k}{2\pi}} \int_0^\infty (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\sqrt{\rho_R}} dy'$$

$$H_z(x, y, z) = H_0 \frac{e^{j\pi/4}}{2} \sqrt{\frac{k}{2\pi}} \int_0^\infty (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\sqrt{\rho_R}} dy' \quad (4.22)$$

La integración sobre y' se hace por partes según la ubicación del punto receptor en las diferentes regiones:

La región iluminada $y > 0$ (región sin distorsión).

La región de sombra $y < 0$ (región con obstáculo).

La región de transición $y = 0$ (región frontera).

4.2.1 Campo en la región iluminada $y > 0$

El de fase estacionaria, puede también ser usado para evaluar la integración de (4.21) sobre y' . En el caso de (4.21), el punto estacionario es el valor $y' = y$, donde la derivada $\frac{d\rho'_R}{dy'}$ se hace cero. Expandiendo ρ_R alrededor de éste punto, el segundo orden sería:

$$\rho_R \approx x + \frac{1}{2x}(y'-y)^2 \quad (4.23)$$

Debido a la dependencia cuadrática de (4.22), la exponencial de (4.21) oscilará de acuerdo a la variación del factor $|y' - y|$, incrementando la frecuencia con el aumento de $|y' - y|$. Como resultado de éste hecho, la parte real de la integral tendrá una dependencia con respecto a y' , como se aprecia en la ilustración 4.7.

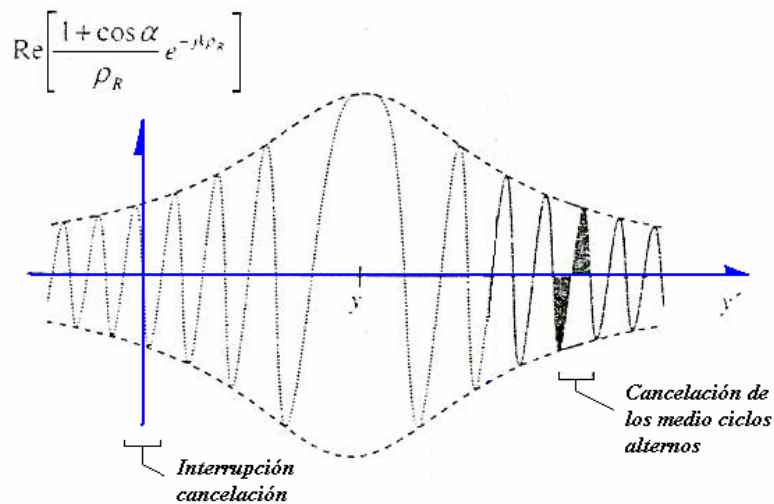


Ilustración 4.7 Variación de la parte real de la integral con respecto a y' alrededor del punto estacionario $y' = y$ localizado en la región iluminada de la media pantalla absorbente.

El término de la amplitud en (4.21) varía lentamente comparándolo con la variación de las oscilaciones. La parte imaginaria posee una dependencia similar.

La primera contribución a la integral, estará dada por un intervalo limitado alrededor de y , donde unas primeras pocas oscilaciones toman lugar. Este intervalo corresponde a la región a través de la cual los campos de las ondas planas se propagan hasta el punto receptor (x, y) como se había discutido en la sección 4.1.2. Lejos de y , los ciclos medios sucesivos de oscilación se cancela entre sí. Sin embargo, el punto final de integración en $y = 0$ interrumpe la cancelación resultando así una segunda contribución a la integral.

Para separar la contribución del punto estacionario de la contribución del punto final, (4.21) es rescrita como:

$$E_z(x, y, 0) = E_0 \frac{e^{j\pi/4}}{2} \sqrt{\frac{k}{2\pi}} \left[\int_{-\infty}^{\infty} (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\sqrt{\rho_R}} dy' - \int_{-\infty}^0 (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\sqrt{\rho_R}} dy' \right]$$

$$H_z(x, y, 0) = H_0 \frac{e^{j\pi/4}}{2} \sqrt{\frac{k}{2\pi}} \left[\int_{-\infty}^{\infty} (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\sqrt{\rho_R}} dy' - \int_{-\infty}^0 (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\sqrt{\rho_R}} dy' \right] \quad (4.24)$$

La primera integral en (4.23) puede ser resuelta utilizando el mismo criterio de aproximación en la integración a lo largo de z' . Así, los términos de las amplitudes son evaluados en el punto estacionario $y' = y$, donde $\alpha = 0$ y $\rho_R = x$ tomados fuera de la integral. ρ_R es aproximado por (4.22) en el exponente.

$$\int_{-\infty}^{\infty} (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\sqrt{\rho_R}} dy' \approx \frac{2e^{-jkx}}{\sqrt{x}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-j \frac{k}{2x} (y' - y)^2\right] dy' = 2e^{-j\pi/4} \sqrt{\frac{2\pi}{k}} e^{-jkx} \quad (4.25)$$

La primera contribución de la segunda integral en (4.23) viene dada por la vecindad del punto final $y' = 0$. Si y es lo suficientemente mayor, de manera que el punto estacionario esté bien separado del punto final, la contribución del punto final puede ser aproximada por la expansión de ρ_R en el exponente alrededor del punto $y' = 0$ y utilizando los dos primeros términos de la expresión. Para la expresión (4.18) la expansión de ρ_R es:

$$\rho_R \approx \rho - y' \frac{y}{\rho} \quad (4.26)$$

donde:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.27)$$

es la distancia desde el filo hasta el punto receptor. Con la anterior aproximación, la segunda integral en (4.23) llega a ser:

$$\int_{-\infty}^0 (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\sqrt{\rho_R}} dy' \approx (1 + \cos \theta) \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} \int_{-\infty}^0 \exp\left(jky' \frac{y}{\rho}\right) dy' = \frac{1 + \cos \theta}{jk(y/\rho)} \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (4.28)$$

Aquí, θ es el ángulo entre el eje x y la línea recta formada por el filo y el punto receptor, de manera que $\sin \theta = \frac{y}{\rho}$.

Sustituyendo (4.24) y (4.27) en (4.23), se obtiene que el campo dado para la región iluminada $y > 0$ está dado por:

$$E_z(x, y, 0) = E_0 e^{-jkx} + E_0 e^{-j\pi/4} \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} D(\theta)$$

$$H_z(x, y, 0) = H_0 e^{-jkx} + H_0 e^{-j\pi/4} \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} D(\theta) \quad (4.29)$$

Donde $D(\theta)$ es el coeficiente de difracción:

$$D(\theta) = -\frac{1}{\sqrt{2\pi k}} \frac{1 + \cos \theta}{2 \sin \theta} \quad (4.30)$$

La ecuación (4.28) presenta el campo como la suma de una onda plana incidentes y una onda cilíndrica propagada a lo largo del filo con dirección dependiente de $D(\theta)$, esto se puede apreciar en la ilustración 4.8.

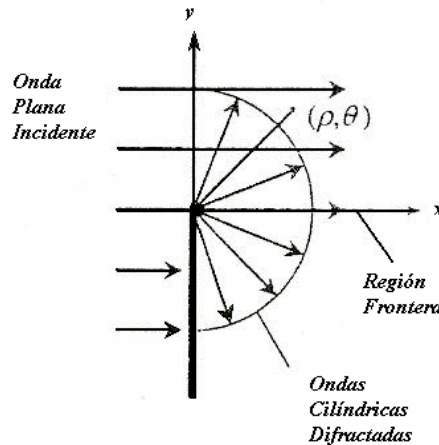


Ilustración 4.8 Onda plana transmitida a través de media pantalla.

Sobre la región $y = 0$, $D(\theta)$ es singular, esto es debido a que en realidad los puntos estacionarios y finales en (4.23) no están bien separados y la aproximación en (4.27) ya no es válida. En las siguientes secciones se deriva

$$H_z(x, y, 0) = H_0 e^{-j\pi/4} \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} D(\theta) \quad (4.32)$$

donde $D(\theta)$ es el mismo que en (4.29).

En la región de sombra, el campo consiste únicamente de las ondas cilíndricas propagadas a lo largo del filo, como se indica en la ilustración 4.8.

4.2.3 Teoría Geométrica de la Difracción (GTD)

Los resultados presentados en (4.28) y (4.31) se suman en la siguiente expresión:

$$E_z(x, y, 0) = E_0 e^{-jkx} U(\theta) + E_0 e^{-j\pi/4} \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} D(\theta)$$

$$H_z(x, y, 0) = H_0 e^{-jkx} U(\theta) + H_0 e^{-j\pi/4} \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} D(\theta) \quad (4.33)$$

Aquí, la función escalón $U(\theta)$ indica que el campo incidente está presente en la región iluminada, pero no en la región de sombra. El segundo término de (4.32) representa las ondas cilíndricas generadas por la difracción en el filo. Sin embargo, (4.32) no es válida para cercanías de la región frontera debido a la naturaleza singular de $D(\theta)$. En realidad, el campo debe ser continuo y finito como se había discutido antes. En la siguiente sección será derivada una función que multiplicada al coeficiente de difracción, elimina la singularidad y da como resultado un campo total continuo. La expresión (4.32) representa la teoría Geométrica de Difracción (GTD) que representa los campos debido a una onda plana que incide sobre una pantalla absorbente.

4.2.4 Evaluando la Integral de Fresnel en la región frontera.

Cuando el punto receptor está cercano a la región frontera, el punto estacionario es cercano al punto final de integración, y la evaluación de las contribuciones del punto final en (4.27) y (4.30) ya no es válida. Para

determinar una expresión de la contribución del punto final que sea válida para todo valor de y , es necesario usar una mayor aproximación para ρ_R en el exponente de (4.27). Así, aproximando ρ_R por una serie de Taylor y usando los tres primeros términos, se tiene:

$$\rho_R = \rho - \frac{y}{\rho} y' + \frac{x^2}{2\rho^3} (y')^2 \quad (4.34)$$

Usando ésta expresión, la integral del punto final en (4.27) para $y > 0$ viene a ser:

$$\int_{-\infty}^0 (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\sqrt{\rho_R}} dy' \approx (1 + \cos \theta) \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} \int_{-\infty}^0 \exp \left\{ -jk \left[\frac{x^2}{2\rho^3} (y')^2 - \frac{y}{\rho} y' \right] \right\} dy' \quad (4.35)$$

Para expresar (4.34) en términos de una función conocida, completamos el cuadrado en el exponente, sumando y restando al exponente, la cantidad:

$$jS = j \frac{k\rho}{2} \frac{y^2}{x^2} = j \frac{k\rho}{2} \tan^2 \theta \quad (4.36)$$

Esta expresión conduce a la siguiente expresión para la integral del punto final:

$$\int_{-\infty}^0 (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\sqrt{\rho_R}} dy' \approx (1 + \cos \theta) \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} \int_{-\infty}^0 \exp \left[-j \left(\frac{x}{\rho} \sqrt{\frac{k}{2\rho}} y' - \sqrt{S} \right)^2 \right] dy' \quad (4.37)$$

La variable de integración es ahora cambiada por:

$$u = - \left(\frac{x}{\rho} \sqrt{\frac{k}{2\rho}} y' - \sqrt{S} \right) \quad (4.38)$$

Para el cual:

$$dy' = -\frac{\rho}{x} \sqrt{\frac{2\rho}{k}} du = -\frac{2\rho}{ky} \sqrt{S} du = -\frac{2\sqrt{S}}{k \sin \theta} du \quad (4.39)$$

Remplazando (4.37) y (4.38) en (4.36), se obtiene:

$$\int_{-\infty}^0 (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\sqrt{\rho_R}} dy' \approx \frac{1 + \cos \theta}{jk \sin \theta} \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} F(S) \quad (4.40)$$

La función de transición $F(S)$ es asociada a la integral de Fresnel y está dada por:

$$F(S) = 2j\sqrt{S} e^{jS} \int_{\sqrt{S}}^{\infty} e^{-ju^2} du \quad (4.41)$$

Más adelante se presentan las expresiones utilizadas para calcular $F(S)$. La aproximación descrita en (4.49) puede ser usada para la región $y < 0$.

Por otra parte, si se utiliza la aproximación (4.33) en (4.21), se obtiene la siguiente expresión:

$$\int_0^{\infty} (1 + \cos \alpha) \frac{e^{-jk\rho_R}}{\sqrt{\rho_R}} dy' \approx -\frac{1 + \cos \theta}{jk \sin \theta} \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} F(S) \quad (4.42)$$

4.2.5 Teoría Uniforme de la Difracción (UTD)

Sustituyendo (4.39) en (4.24) para $y > 0$ y sustituyendo (4.41) en (4.21) para $y < 0$, el campo total en la región de transición cerca al región frontera, es calculada por:

$$E_z(x, y, 0) = E_0 e^{-jkx} U(y) + E_0 e^{-j\pi/4} \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} D_T(\theta)$$

$$H_z(x, y, 0) = H_0 e^{-jkx} U(y) + E_0 e^{-j\pi/4} \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} D_T(\theta) \quad (4.43)$$

Debido a que la expresión (4.42) es válida para la región iluminada, la región frontera y la región de sombra; representa la solución de la teoría uniforme de la difracción (UTD). El coeficiente de difracción de la teoría uniforme de difracción (UTD) es dado por:

$$D_T(\theta) = D(\theta)F(S) \quad (4.44)$$

donde $D(\theta)$ es el coeficiente de difracción de GTD definido en (4.29). La variación con respecto a y de la magnitud del campo total (4.42), expresado en decibeles, es mostrado en la ilustración 4.10 para $A_0 = 1$, $x = 30m$ y $f = 900MHz$. Se observa que el campo es continuo en $y = 0$ (la región frontera), donde su valor es $\frac{1}{2}$ o $-6dB$. Las oscilaciones alrededor de la amplitud de la onda plana incidente en la región iluminada ($y > 0$), son debido a la interferencia entre las contribuciones de las ondas directas y difractadas. En la región sombra ($y < 0$), los campos presentan un fuerte decremento en la amplitud. En $y = -10m$, el ángulo de difracción es únicamente $|\theta| = 18^\circ$ y la amplitud de la señal es disminuida hasta $-26dB$. Así, la difracción alrededor de una esquina reduce significativamente la señal recibida. La función $F(s)$ puede ser calculada usando:

$$F(S) = \sqrt{2\pi S} \left[f(\sqrt{2S/\pi}) + jg(\sqrt{2s/\pi}) \right] \quad (4.45)$$

La función $f(\xi)$ y $g(\xi)$ están asociadas con la integral de Fresnel y para todos los valores posibles de ξ pueden ser calculadas por:

$$f(\xi) = \frac{1 + 0.926\xi}{2 + 1.792\xi + 3.104\xi^2}$$

$$g(\xi) = \frac{1}{2 + 4.142\xi + 3.492\xi^2 + 6.670\xi^2} \quad (4.46)$$

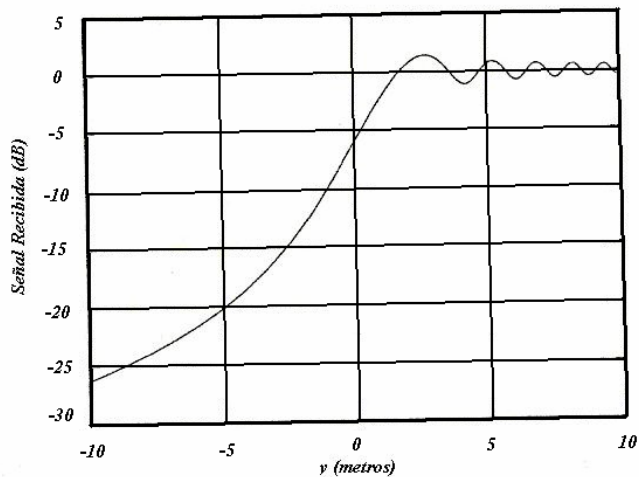


Ilustración 4.10 Variación del campo total con respecto a la ubicación del receptor sobre el eje y

4.3 DIFRACCION EN OTROS ELEMENTOS.

Los análisis llevados a cabo para describir la difracción debida a una pantalla absorbente, pueden ser usados también para describir la difracción en una esquina u otra pantalla con condiciones de frontera diferentes. Análisis diferentes sobre estos elementos demuestran que el campo total consiste básicamente de los campos ópticos geométricos y los campos difractados en forma de ondas cilíndricas a lo largo del borde de la pantalla. Los campos ópticos geométricos están formados de aquellas ondas incidentes y reflejadas en la pantalla. Estas componentes sólo pueden iluminar una porción del espacio sobre la región de sombra, como se aprecia en la ilustración 4.11 y 4.12.

El coeficiente de difracción el cual proporciona la dependencia con respecto a la orientación de los campos difractados, dependen también del material de la pantalla, ángulo de la esquina, ángulo de incidencia ϕ' y la polarización.

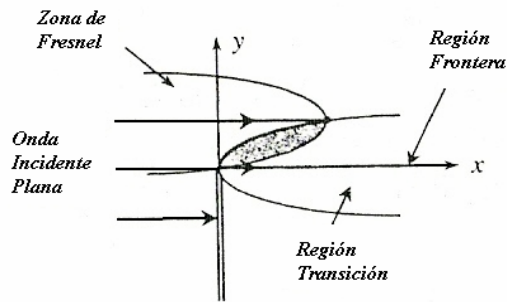


Ilustración 4.11 Zonas de transición

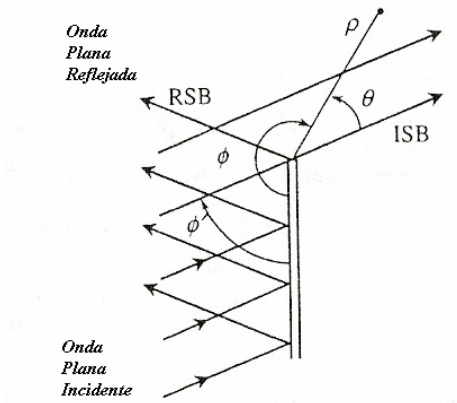


Ilustración 4.12 Ondas planas incidentes y reflejadas sobre una pantalla

4.3.1 Pantalla absorbente

Felsen llevó a cabo rigurosos estudios de difracción sobre superficies absorbentes. Cuando el ángulo interno de una esquina se hace cero, la esquina llega a ser una pantalla absorbente como la mostrada en 4.9. En las secciones anteriores, el método Kirchhof – Huygens fue empleado bajo la suposición de que el campo total a la derecha de la pantalla, era igual al campo incidente y posteriormente se hacía cero. Sin embargo el campo difractado en (4.42) no es cero en el plano de la pantalla $\theta = \frac{\pi}{2}$. Lo cual es inconsistente con la suposición inicial. A partir de ello, se ha determinado para una onda plana incidente con un ángulo ϕ' , un coeficiente de difracción GTD proveniente de resultados de aproximaciones más rigurosas:

$$D = \frac{-1}{\sqrt{2\pi k}} \left[\frac{1}{\pi - (\phi - \phi')} + \frac{1}{\pi + (\phi - \phi')} \right] = \frac{-1}{\sqrt{2\pi k}} \left[\frac{1}{\theta} + \frac{1}{2\pi - \theta} \right] \quad (4.47)$$

donde los ángulos ϕ , ϕ' y θ están en radianes y son definidos en la ilustración 4.12. La expresión se aplica para todo tipo de polarización de la onda incidente y para un ángulo interno de esquina menor a π .

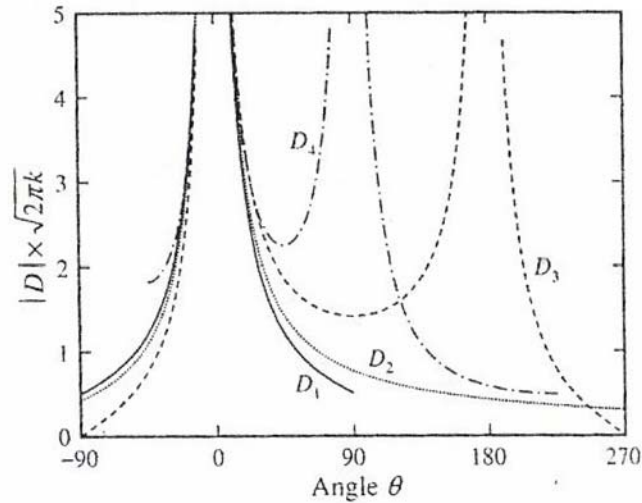


Ilustración 4.13 Variación del coeficiente de difracción con respecto al ángulo de incidencia de la señal.

Cuando expresamos en término de $\theta = \pi - (\phi - \phi')$, el coeficiente de difracción se hace independiente del ángulo ϕ' (ángulo entre el ángulo incidente y la superficie de la esquina o pantalla). Este resultado es válido aún para $\theta > \frac{\pi}{2}$. El coeficiente de difracción de (4.47), es comparado con el coeficiente de Kirchhof-Huygens (4.30) en la ilustración 4.13.

La teoría que acaba de ser presentada es necesaria para comprender el contenido del siguiente capítulo, en donde se parte de la formulación UTD para describir el comportamiento de las señales de información en entornos específicos y se logra establecer un método de predicción en dichos entornos.

CAPITULO 5

MODELO DE PROPAGACIÓN ANDINO-UIS®

Recientemente en Colombia, los sistemas de comunicación inalámbrica y en mayor grado, los sistemas de comunicación móvil, han tenido una fuerte incursión en el panorama nacional de las telecomunicaciones. Los entes investigativos como el Grupo de Investigación en Radiocomunicaciones RadioGIS, de la *Universidad Industrial de Santander*, han venido desarrollando proyectos de investigación en el área de radiopropagación para definir parámetros de predicción de la Intensidad de campo irradiado por parte de los sistemas de comunicación inalámbrica sobre la región Andina.

En el presente estudio, se plantea el modelo de propagación Andino-UIS® originado a partir del análisis de los resultados presentados en estudios anteriores sobre el modelo de propagación *COST231- Walfisch-Ikegami*, llevados a cabo por RadioGIS y apoyados por la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Las nuevas soluciones propuestas dentro del modelo Andino-UIS® implican factores que aún no han sido considerados en la radiopropagación, este es el caso del comportamiento de la señal en presencia de vías convergentes y la viabilidad de la aplicación de nuevas teorías de difracción sobre cilindros para modelamiento del terreno.

En este capítulo se presenta la concepción del modelo Andino-UIS® y sus características. Antes de ello, se hace una introducción al modelo referencia.

5.1 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE PROPAGACIÓN COST231-WALFISCH-IKEGAMI.

En ésta sección sólo se presentará una breve descripción de éste modelo, se puede hacer referencia a un estudio del mismo en la investigación “*Cobertura para sistemas móviles celulares en entorno urbano escarpado*”³⁸.

Éste modelo incorpora a la estimación de Path Loss parámetros que describen las características de un ambiente urbano, como lo son: alturas de edificios (h_{Roof}), ancho de las calles (w), separación entre edificios (b) y orientación de las vías (φ). En las ilustraciones 5.1 y 5.2 se muestran estos parámetros.

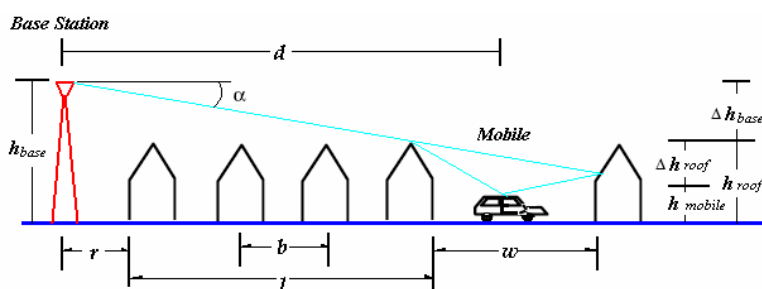


Ilustración 5.1. Parámetros del modelo. Geometría en terreno plano

Éste modelo es de tipo estadístico, esto implica que sus parámetros son obtenidos a partir de análisis empíricos y esto hace que el nivel de predicción del mismo esté limitado por el tipo de entorno en donde sea aplicado.

El modelo distingue entre situaciones de línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS). En el caso de LOS se aplica la fórmula:

$$L_b(dB) = 42.6 + 26\log(d) + 20\log(f) \quad (5.1)$$

para $d \geq 20m$, d expresada en km y f expresada en MHz.

³⁸ García Ariza Alexis Paolo, Cobertura para sistemas móviles celulares en entorno urbano escarpado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Bucaramanga, Colombia, 2002.

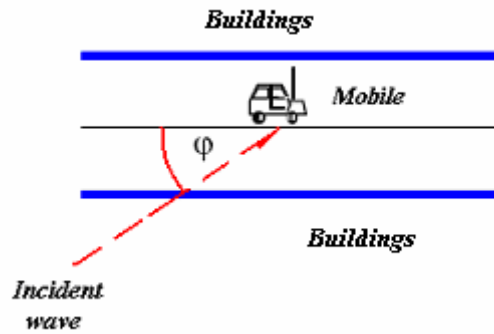


Ilustración 5.2. Definición del ángulo de orientación de la vía

Para NLOS, el total de pérdidas está dado por:

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad \text{para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \quad (5.2)$$

donde L_0 son las pérdidas por espacio libre, L_{msd} son las pérdidas por difracción de múltiples filos de cuchillo antes del techo del edificio final y L_{rts} (*roof-top-to-street*) las pérdidas debidas a una única difracción final hacia el nivel de la calle, ocasionada por el techo del último edificio, y un proceso de dispersión ocurrido a ésta altura. Las pérdidas por espacio libre están dadas por:

$$L_0 (dB) = 32.4 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (5.3)$$

para d expresada en km y f expresada en MHz.

La determinación de L_{rts} se basa principalmente en el modelo de Ikegami, teniendo en cuenta el ancho de las calles y su orientación. El COST 231-Walfisch-Ikegami aplica otra función de orientación para las vías, diferente a la de Ikegami, resultando en:

$$L_{rts} = -16.9 - 10\log(w) + 10\text{Log}(f) + 20\text{Log}(\Delta h_{Mobile}) + L_{Ori} \quad (5.4)$$

donde w es la distancia entre las caras de los edificios ubicados a los lados de la calle donde se encuentra el MS, típicamente $w \approx b/2$ y se expresa en metros, f en MHz y Δh_{Mobile} en metros.

La función anterior fue posteriormente corregida por Har-Dongsoo³⁹, resultando la ecuación:

$$L_{rts} = -8.2 - 10 \log(w) + 10 \text{Log}(f) + 20 \text{Log}(\Delta h_{Mobile}) + L_{Ori} \quad (5.5)$$

El término final de (5.5) considera la orientación de las calles a un ángulo φ según como se indica a continuación.

$$L_{Ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi \rightarrow 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) \rightarrow 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55) \rightarrow 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5.6)$$

además

$$\Delta h_{Mobile} = h_{Roof} - h_{Mobile} \quad (5.7)$$

La difracción debida a la presencia de múltiples techos de edificios separados a lo largo del trayecto de radio-propagación, en el término L_{msd} en (5.2), es modelada por pantallas absorbentes de la misma altura de los edificios y las pérdidas a las que conlleva están dadas por:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \text{Log}(d) + k_f \text{Log}(f) - 9 \text{Log}(b) \quad (5.8)$$

donde d se da en kilómetros, f en MHz, b en metros y cada unos de los parámetros adicionales de (5.8) se especifican a continuación.

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_{Base}) & \text{para } h_{Base} > h_{Roof} \\ 0 & \text{para } h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases} \quad (5.9)$$

³⁹ Dongsoo Har, Alix M. Watson and Anthony G. Chadney, "Comment on Diffraction Loss of Rooftop-to-Street in COST 231-Walfisch-Ikegami Model", *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol. 48, No. 5, September 1999.

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_{Base} > h_{Roof} \\ 54 - 0.8\Delta h_{Base} & \text{para } d \geq 0.5km \text{ y } h_{Base} \leq h_{Roof} \\ 54 - 0.8\Delta h_{Base} \frac{d}{0.5} & \text{para } d < 0.5km \text{ y } h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases} \quad (5.10)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_{Base} > h_{Roof} \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_{Base}}{h_{Roof}} & \text{para } h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases} \quad (5.11)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \left. \begin{array}{l} \text{para ciudades medianas} \\ \text{y centros suburbanos con} \\ \text{mediana densidad de arboles} \end{array} \right\} \\ 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para centros metropolitanos} \end{cases} \quad (5.12)$$

donde

$$\Delta h_{Base} = h_{Base} - h_{Roof} \quad (5.13)$$

El término k_a representa el incremento de Path Loss debido a una antena de la radio base ubicada a una altura menor a la de los techos de los edificios adyacentes. Los términos k_d y k_f controlan la dependencia de las pérdidas por difracción debidas a múltiples filos de cuchillos versus la distancia y la frecuencia de radio, respectivamente. Por otro lado, si las características de los edificios y las calles son desconocidas, los siguientes valores por defecto, para los parámetros, pueden ser utilizados para la realización de un trabajo aproximado:

$$h_{Roof} = \begin{cases} 3m * n_{floors} \rightarrow \text{para techos planos} \\ 3m * n_{floors} + 3m \rightarrow \text{para techos puntiagudos} \end{cases} \quad (5.14)$$

$b = 20 \dots 50m, w = b / 2, \varphi = 90^\circ$

donde n_{floors} es el número de pisos de los edificios. El modelo está restringido para $800MHz \leq f \leq 2000MHz$, $4m \leq h_{Base} \leq 50m$, $1m \leq h_{Mobile} \leq 3m$ y $0.02km \leq d \leq 5km$, comportándose de forma muy adecuada para situaciones donde la altura de la antena de la BS es mayor que la de los edificios.

Se pueden presentar grandes errores para condiciones donde $h_{Base} \approx h_{Roof}$ y un desempeño pobre cuando $h_{Base} \ll h_{Roof}$. Por otro lado, debido a que los parámetros b , w y φ no son considerados físicamente significativos en micro-celdas el error en la predicción de Path Loss en estos casos puede ser demasiado grande.

El modelo no considera propagación multi-trayectoria y su confiabilidad en la estimación del Path Loss disminuye si el terreno no es plano o si la región de cobertura no es homogénea, casos que han sido de especial análisis en este y anteriores trabajos en busca de adaptar el modelo a las condiciones de las ciudades Andinas.

5.2 ESTUDIOS DE DIFRACCIÓN EN CONVERGENCIA DE VÍAS

En los estudios de radiopropagación son considerados fenómenos físicos como la Reflexión, Difracción, Scattering, transmisión a través de las paredes y pérdidas en espacio libre. Dependiendo del tipo de ambiente sobre el cual se lleve a cabo el análisis (*entornos indoors u outdoors*), se enfatiza sobre fenómenos particulares, por ejemplo, cuando se analizan *entornos indoors* fenómenos como la reflexión en las paredes se convierte en un parámetro relevante, si por el contrario se analiza *entornos outdoors* las pérdidas por espacio libre pasará a ser uno de los parámetros de mayor interés, no con esto se le resta importancia al resto de fenómenos de propagación puesto que no dejan de contribuir a las pérdidas.

Cuando se analiza el entorno característico de una convergencia de vías, se llega a la conclusión de que la Difracción en las esquinas⁴⁰ es el principal fenómeno ocurrente. El presente estudio ha hecho énfasis en éste factor para determinar el comportamiento de las señales en dichas zonas.

⁴⁰ Cuando se hace referencia al término esquina, se entiende por éste un elemento conformado por la intersección de dos paredes correspondientes a un edificio, o cualquier otro elemento que presente esta particular forma.

5.2.1 Difracción en esquinas.

La energía difractada en las esquinas puede ser modelada mediante los coeficientes de difracción establecidos en la Teoría Uniforme de Difracción (UTD). Ésta teoría se establece considerando esquinas de conductividad finita y coeficientes de difracción aproximados, también considera que no ocurre transmisión de la señal a través del material de la esquina. Otros elementos de difracción pueden también ser tenidos en cuenta en el análisis como por ejemplo, un cilindro perfectamente conductor de altura infinita o un panel finito perfectamente conductor, sin embargo, para el estudio del comportamiento de los campos en las convergencias de vías es más eficaz el considerar una cuña (esquina) de conductividad finita y perfectamente reflectora.

La geometría básica de la difracción en esquinas es como muestra la ilustración 5.3.

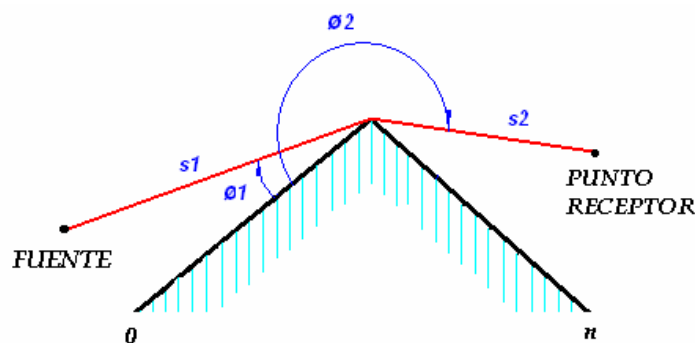


Ilustración 5.3. Geometría básica de Difracción en esquinas.

Según los lineamientos de la Recomendación ITU-R P.526-8 (los cuales se presentan en el anexo D)⁴¹, la formulación UTD para el campo eléctrico en el punto receptor está dada por:

$$e_{UTD} = e_0 \frac{e^{-jks1}}{s1} D \left| \left| \perp \sqrt{\frac{s1}{s2(s1 + s2)}} e^{-jks2} \right. \right. \quad (5.15)$$

⁴¹ Recommendation ITU-R P.526-8 "Propagation by diffraction".

- e_{UTD} : Magnitud de campo en el punto receptor.
- e_0 : Magnitud de campo de la fuente.
- S_1 : Distancia de la fuente a la esquina de difracción.
- S_2 : Distancia de la esquina de difracción hasta el punto receptor.
- k : Número de onda $2\pi/\lambda$.
- $D|_{\perp}$: Coeficiente de difracción dependiendo de la polarización de la señal (paralela o perpendicular al plano de incidencia) del campo incidente en la esquina.

El coeficiente de difracción para una esquina de conducción infinita está dado por:

$$D|_{\perp} = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}} \left\{ \begin{array}{l} \cot\left(\frac{\pi + (\phi_2 - \phi_1)}{2n}\right) F(kLa^+(\phi_2 - \phi_1)) \\ + \cot\left(\frac{\pi - (\phi_2 - \phi_1)}{2n}\right) F(kLa^-(\phi_2 - \phi_1)) \\ + R_0|_{\perp} \cot\left(\frac{\pi - (\phi_2 - \phi_1)}{2n}\right) F(kLa^-(\phi_2 - \phi_1)) \\ + R_n|_{\perp} \cot\left(\frac{\pi + (\phi_2 + \phi_1)}{2n}\right) F(kLa^+(\phi_2 + \phi_1)) \end{array} \right\} \quad (5.16)$$

ϕ_1 : Angulo incidente.

ϕ_2 : Angulo de difracción.

n : Angulo externo de la esquina múltiplo de π radianes. Por ejemplo si el ángulo interno de la esquina es 0.5π (90°), el ángulo externo será 1.5π (270°) y $n = 1.5$

$F(x)$: Integral de Fresnel.

$$F(x) = 2j\sqrt{x}e^{jx} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-jt^2} dt \quad (5.17)$$

$$\int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-jt^2} dt = \sqrt{\frac{\pi}{8}}(1-j) - \int_0^{\sqrt{x}} e^{-jt^2} dt \quad (5.18)$$

La integral puede ser calculada por integración numérica. Una aproximación alternativa está dada por:

$$\int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-jt^2} dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} A(x) \quad (5.19)$$

$$A(x) = \begin{cases} \frac{1-j}{2} - e^{-jx} \sqrt{\frac{x}{4}} \sum_{n=0}^{11} \left[(a_n + jb_n) \left(\frac{x}{4}\right)^n \right] & \text{si } x < 4 \\ -e^{-jx} \sqrt{\frac{4}{x}} \sum_{n=0}^{11} \left[(c_n + jd_n) \left(\frac{4}{x}\right)^n \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.20)$$

Los coeficientes a, b, c, d tienen los valores:

a0 =	+1.595769140	b0 =	-0.000000033	c0 =	+0.000000000	d0 =	+0.199471140
a1 =	-0.000001702	b1 =	+4.255387524	c1 =	-0.024933975	d1 =	+0.000000023
a2 =	-6.808568854	b2 =	-0.000092810	c2 =	+0.000003936	d2 =	-0.009351341
a3 =	-0.000576361	b3 =	-7.780020400	c3 =	+0.005770956	d3 =	+0.000023006
a4 =	+6.920691902	b4 =	-0.009520895	c4 =	+0.000689892	d4 =	+0.004851466
a5 =	-0.016898657	b5 =	+5.075161298	c5 =	-0.009497136	d5 =	+0.001903218
a6 =	-3.050485660	b6 =	-0.138341947	c6 =	+0.011948809	d6 =	-0.017122914
a7 =	-0.075752419	b7 =	-1.363729124	c7 =	-0.006748873	d7 =	+0.029064067
a8 =	+0.850663781	b8 =	-0.403349276	c8 =	+0.000246420	d8 =	-0.027928955
a9 =	-0.025639041	b9 =	+0.702222016	c9 =	+0.002102967	d9 =	+0.016497308
a10 =	-0.150230960	b10 =	-0.216195929	c10 =	-0.001217930	d10 =	-0.005598515
a11 =	+0.034404779	b11 =	+0.019547031	c11 =	+0.000233939	d11 =	+0.000838386

Otros parámetros son:

$$L = \frac{s2 * s1}{s2 + s1} \quad (5.21)$$

$$a^{\pm}(\beta) = 2 \cos^2 \left(\frac{2n\pi N^{\pm} - \beta}{2} \right) \quad (5.22)$$

$$\beta = \phi2 \pm \phi1 \quad (5.23)$$

N^{\pm} Son los primeros enteros que satisfacen la ecuación:

$$N^{\pm} = \frac{\beta \pm \pi}{2n\pi} \quad (5.24)$$

$R_0 \left| \begin{array}{l} \perp \\ \perp \end{array} \right., R_n \left| \begin{array}{l} \perp \\ \perp \end{array} \right.$ de la ecuación (5.16) son los coeficientes de reflexión para los casos de polarización perpendicular o paralela, y están dados por:

$$R_{\perp} = \frac{\sin(\phi) - \sqrt{\eta - \cos^2(\phi)}}{\sin(\phi) + \sqrt{\eta - \cos^2(\phi)}} \quad (5.25)$$

$$R_{\parallel} = \frac{b^* \sin(\phi) - \sqrt{\eta - \cos^2(\phi)}}{b^* \sin(\phi) + \sqrt{\eta - \cos^2(\phi)}} \quad (5.26)$$

$\phi = \phi_1$ para R_0 y $\phi = (n\pi - \phi_2)$ para R_n .

$$\eta = \varepsilon_r - j * 18 * 10^9 \frac{\sigma}{f} \quad (5.27)$$

ε_r : Constante dieléctrica relativa del material de la esquina.

σ : Conductividad del material de la esquina. (S/m).

f : Frecuencia (MHz).

La función cotangente definida en los coeficientes de Difracción, puede llegar a ser singular (esto ocurre cuando $\phi_2 - \phi_1 = \pi$), en este caso se aplica otra función la cual es descrita por Bertoni⁴².

Existen casos en los que puede o no haber línea de vista entre el Transmisor y el Receptor, según esto:

$$e_{LD} = \begin{cases} e_{UTD} + \frac{e^{-jks}}{s} & \text{for } \phi_2 < \phi_1 + \pi & LOS \\ e_{UTD} & \text{for } \phi_2 \geq \phi_1 + \pi & NLOS \end{cases} \quad (5.28)$$

s : Distancia mínima entre la Fuente y el punto del receptor.

Expresando en dB tenemos:

$$E_{UTD} = 20 \log \left(\left| \frac{s^* e_{UTD}}{e^{-jks}} \right| \right) \quad (5.29)$$

De la formulación anterior es necesario hacer las siguientes observaciones:

⁴² Henry L. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, USA: Prentice Hall PTR, 2000

- Se considera que las dos superficies que conforman la esquina poseen propiedades eléctricas semejantes, es decir, tanto la constante dieléctrica relativa (ϵ_r) como la conductividad (σ), son constantes en todo el material.
- La difracción viene a ser dependiente de varios parámetros: la frecuencia (f), las distancias relativas entre el transmisor y receptor con respecto al elemento difractor (S_1, S_2), los ángulos de incidencia y reflexión de los campos con respecto al elemento difractor (ϕ_1, ϕ_2) y los coeficientes de difracción y reflexión para una señal con polarización paralela o perpendicular ($D| | \perp, R| | \perp$).

Con el fin de determinar la influencia de cada uno de los parámetros mencionados, se ha implementado en Matlab[®] el algoritmo de la formulación UTD. Su respectivo código se presenta en el Anexo C. Se busca además de realizar análisis comparativos, tener una guía de simulación del comportamiento de la señal en los alrededores de una esquina usando datos específicos provenientes de una base de datos.

Los parámetros de referencia utilizados en las simulaciones que se presentan a continuación, fueron elegidos teniendo como referencia las características del entorno y del sistema de comunicación utilizado para la investigación, más adelante serán justificados.

- Frecuencia de operación f (MHz): 800MHz
- Conductividad del material de la esquina σ (S/m): 1(S/m).
- Constante Dieléctrica Relativa típica ϵ_r : 15
- El campo Difractado es medido en porcentaje, es decir $e_0 = 100$.
- Distancia entre transmisor y esquina S_1 (metros): 100m

- Distancia entre esquina y receptor S_2 (metros): $\frac{\sqrt{2}}{2}w \approx 7mt$ con $w \approx 10mt$
- Angulo entre Transmisor y esquina ϕ_1 (radianes): $\frac{\pi}{4}$
- Angulo entre esquina y receptor ϕ_2 (radianes): $\frac{3}{4}\pi$
- Polarización Perpendicular.

En cada simulación, se analizó la influencia de la variación de un parámetro mientras los demás tomaban las condiciones de referencia acabadas de mencionar.

El primer parámetro analizado es la frecuencia. Para un rango de 1GHz - 2GHz se obtiene la relación graficada en la ilustración 5.4:

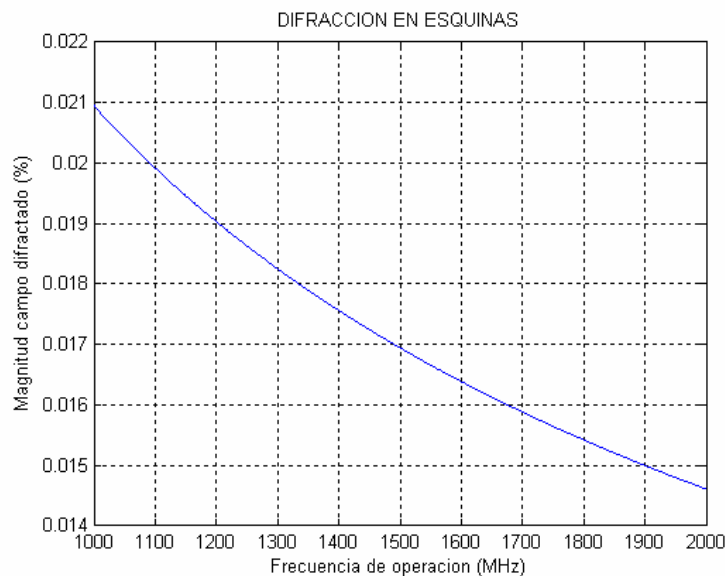


Ilustración 5.4. Campo difractado vs. Frecuencia.

En éste rango de frecuencias, la magnitud de campo difractado cambia en órdenes de 10^{-3} . Para un rango de 300KHz - 1GHz, la relación entre la frecuencia y la magnitud del campo difractado se muestra en la ilustración 5.5.

Sin embargo, las teorías aplicadas al fenómeno de difracción sólo se cumplen en la banda UHF. Si la longitud de onda es muy grande (bajas frecuencias) los obstáculos no se comportan igual, incluso una esquina puede no causar difracción. Por ejemplo, en AM debido a la baja frecuencia las casas dejan de ser un obstáculo para las ondas que tienen una longitud de onda muy grande.

Teniendo entonces en cuenta sólo las frecuencias de la banda UHF, se observa una relación casi lineal con un efecto mínimo de desvanecimiento. Ver ilustración 5.4.

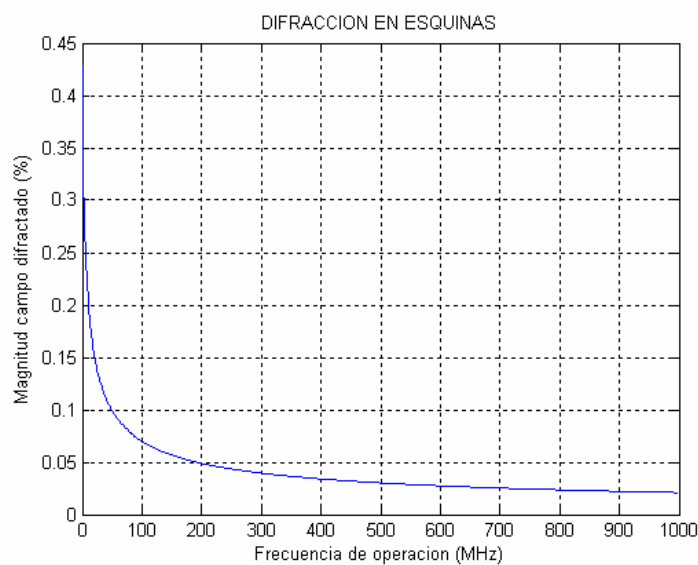


Ilustración 5.5. Campo difractado vs. Frecuencia.

La siguiente relación a establecer es la existente en las distancias entre el punto de difracción y los puntos de transmisión y recepción.

Primero se analiza la relación con respecto a la distancia del transmisor (S_1) a una a una frecuencia de 800MHz.

Para un rango de 100 a 800mt se registran cambios en órdenes de $20 \cdot 10^{-3}$ en la magnitud del campo difractado.

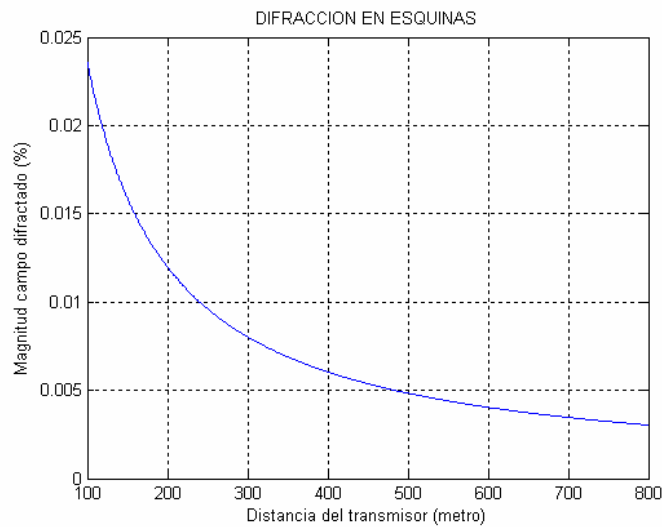


Ilustración 5.6. Campo difractado vs. Distancia s_1 .

Para un rango de 10 a 100mt se registran cambios en los órdenes de $140 \cdot 10^{-3}$

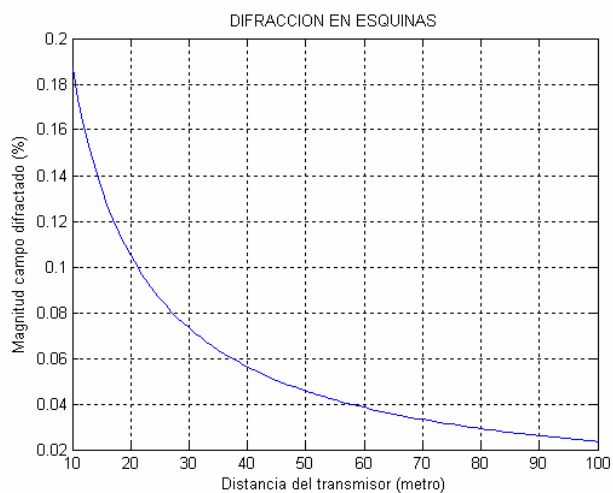


Ilustración 5.7. Campo difractado vs. Distancia s_1 .

A distancias superiores a los 100mt el desvaneciendo de la señal no es tan considerable, sin embargo, lo es para distancias menores. En el siguiente análisis se complementan estos resultados.

Considérese ahora, la influencia en la variación del campo con respecto a las distancias entre el punto de difracción y los puntos de recepción (S_2). Se ha analizado la relación entre el campo difractado y la variación de S_2 teniendo en

cuenta las condiciones de S_1 . En la ilustración 5.8, 5.9 y 5.10 se muestra la relación de campo difractado con respecto a S_2 para distintos valores de S_1 .

Para una distancia $S_1 = 50\text{mt}$ se manejan valores de $80 \cdot 10^{-3}$, ver ilustración 5.8

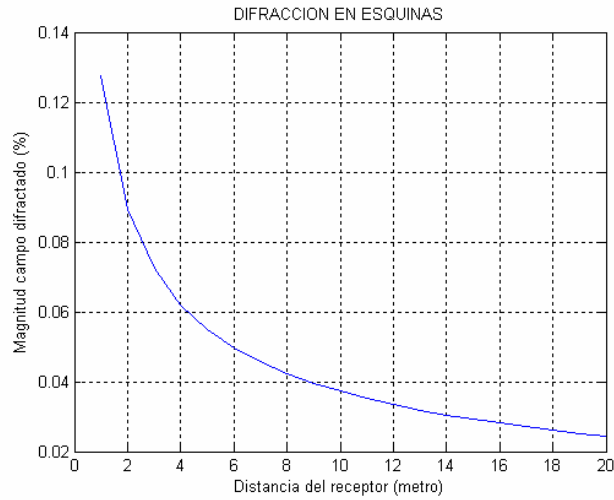


Ilustración 5.8. Campo difractado vs. Distancia s_2 con $s_1 = 50\text{mt}$.

Para una distancia $S_1 = 100\text{mt}$ se manejan valores de $40 \cdot 10^{-3}$, ver ilustración 5.9.

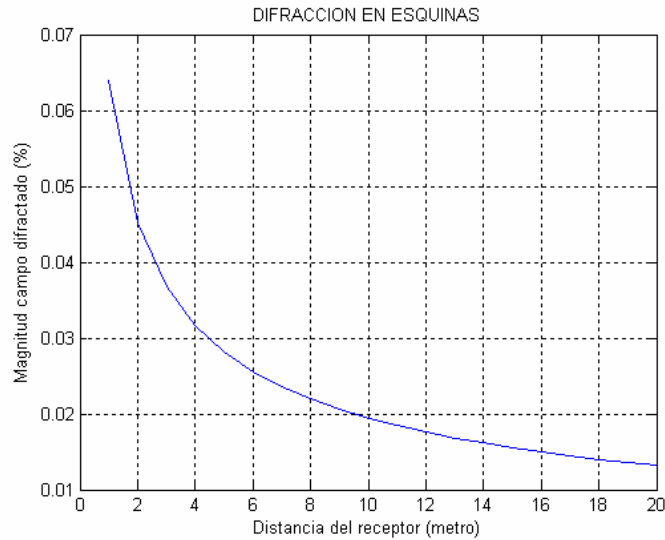


Ilustración 5.9. Campo difractado vs. Distancia s_2 con $s_1 = 100\text{mt}$

Para una distancia $S_1 = 800\text{mt}$ se manejan valores de $7 \cdot 10^{-3}$, ver ilustración 5.10.

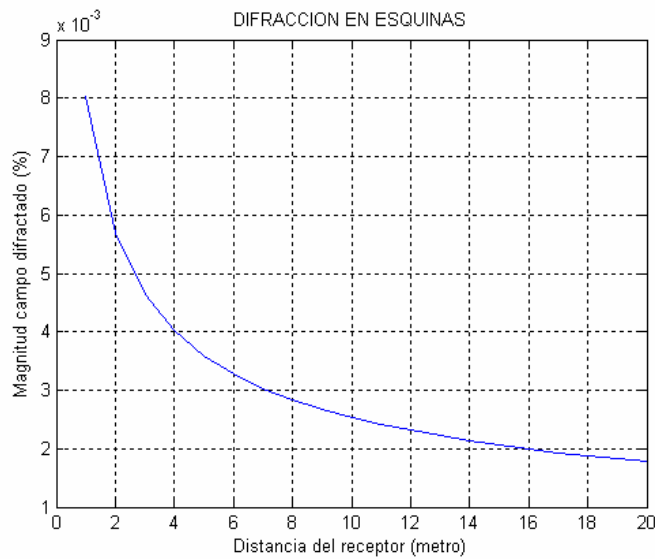


Ilustración 5.10. Campo difractado vs. Distancia s2 con s1 = 800mt.

A medida que el receptor se aleja del elemento difractor, la magnitud del campo registrado es menor. Sin embargo, si además se considera la distancia del transmisor, se observa que a distancias mayores el campo es prácticamente constante alrededor del elemento difractor y para distancias cercanas a la posición transmisor es importante la ubicación del receptor con respecto al elemento difractor.

Como conclusión, un elemento difractor que se encuentre a una distancia mayor a 100mt con respecto al transmisor, produce un desvanecimiento casi constante a los alrededores del mismo, haciendo que la difracción de la señal sea prácticamente independiente de la posición del receptor con respecto al elemento difractor que en este caso corresponde a una esquina. Sin embargo, para distancias cercanas al transmisor, tanto la posición del receptor como la del transmisor, son determinantes en el desvanecimiento de la señal. En entornos *outdoors* se trabaja con distancias considerables por lo tanto se puede hacer caso omiso de la posición del receptor con respecto al elemento difractor y considerar constante la magnitud del campo difractado alrededor de la esquina, obviamente, para condiciones de entornos *indoors* no se podría establecer lo mismo.

A diferencia de las relaciones encontradas anteriormente, la variación de los ángulos produce una fuerte influencia en el campo difractado. Como se observa en las ilustraciones 5.11 y 5.12, existen ángulos para los cuales es mayor la magnitud del campo difractado. Más adelante se analiza a fondo éste parámetro.

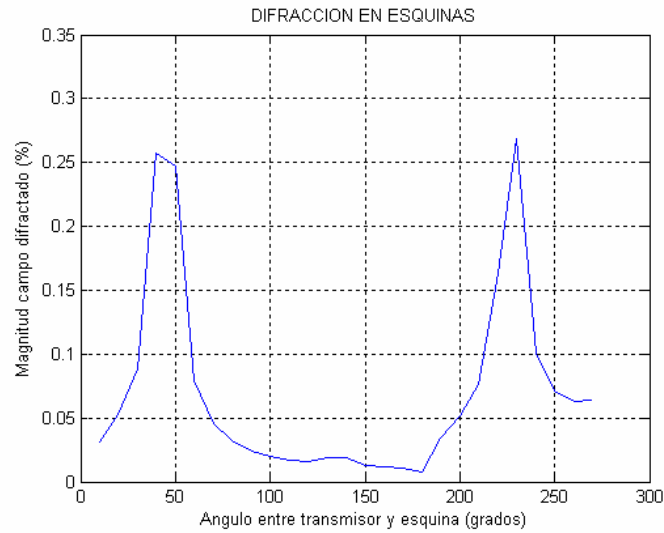


Ilustración 5.11. Campo difractado vs. ϕ_1 .

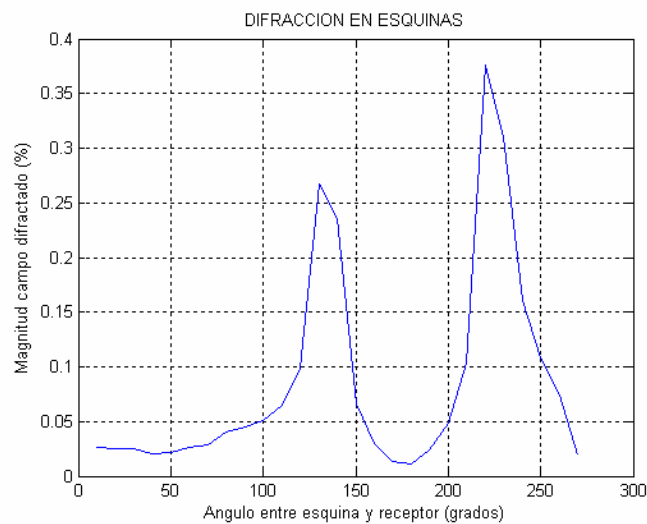


Ilustración 5.12. Campo difractado vs. ϕ_2 .

También se analiza la influencia de las variables relacionadas con las propiedades eléctricas (η , ϵ_r) de la superficie difractora. Ver ilustración 5.13 y 5.14.

Para la constante dieléctrica relativa, la magnitud registra cambios en los ordenes de 10^{-4} , con respecto a ϵ_r .

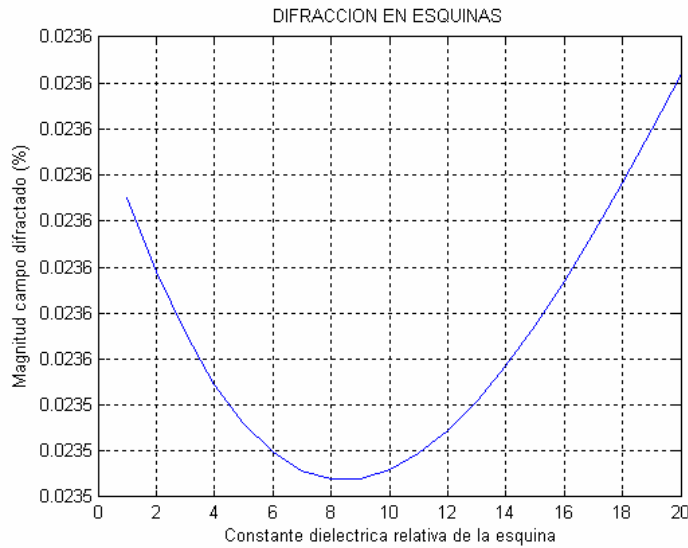


Ilustración 5.13 Campo difractado vs. ϵ_r .

El experimento demuestra que la magnitud cambia en ordenes de 10^{-4} de acuerdo a la variación de la conductividad de la esquina.

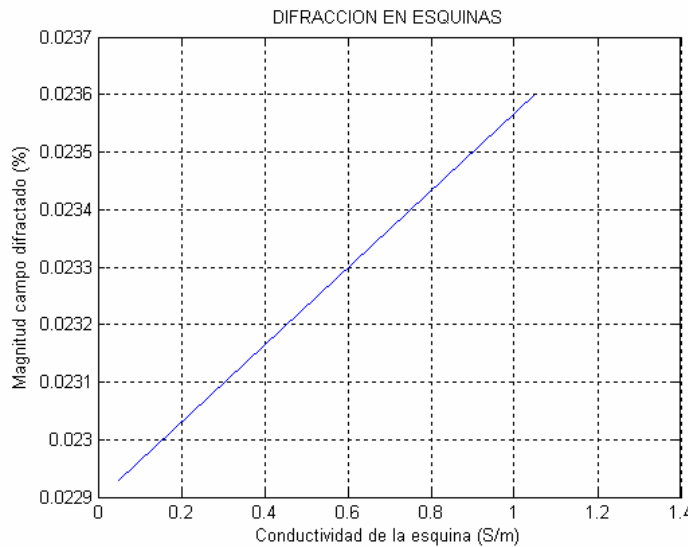


Ilustración 5.14 Campo difractado vs. σ .

Con lo anterior, se puede asegurar que al momento de omitir las propiedades eléctricas de la superficie, no se incurra en errores considerables.

Otra parte que aparentemente resta por determinar, es la influencia de los coeficientes de difracción y reflexión sobre el campo difractado, pero debido a que estos parámetros dependen directamente de los ya estudiados, queda determinado implícitamente su análisis.

5.2.2 Difracción en convergencias de vías.

Una convergencia de vías es un entorno formado por un conjunto de esquinas (Ilustración 5.15), el número de esquinas lo determina la forma de la vía. Existen dos formas básicas que son: forma de cruz (cuatro esquinas) y forma de T (dos esquinas). Según lo expuesto en la sección anterior, la Teoría de la Difracción Uniforme proporciona una herramienta efectiva para predecir la difracción en las convergencias de vías, sin embargo su implementación sólo se logra en programas de predicción basados en el trazado de rayos (*ray-tracing*) como por ejemplo, el CRC- Predicts.

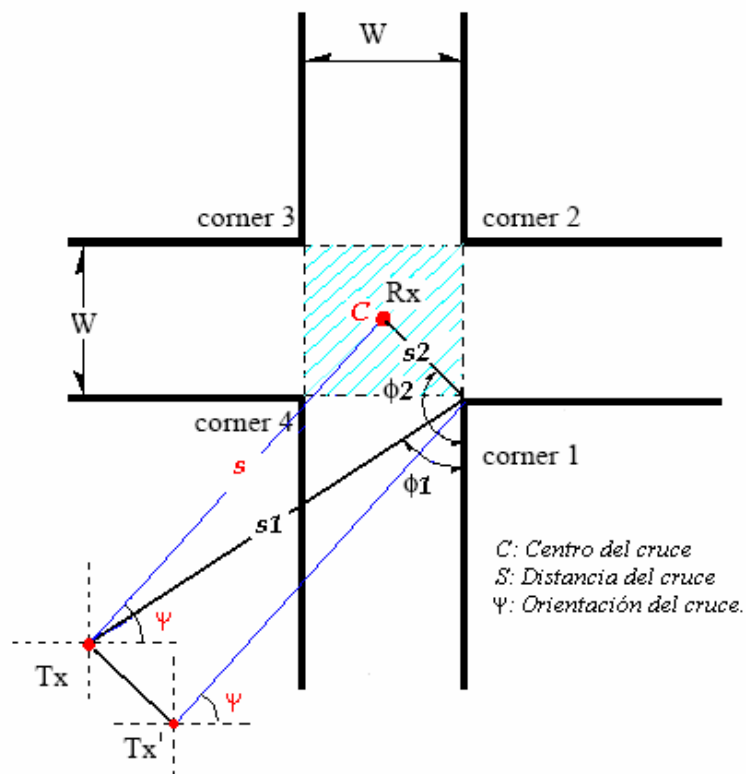


Ilustración 5.15 Geometría básica de una convergencia de vías.

Se establece un replanteamiento de la forma básica de la formulación UTD, considerando que se cuenta con una herramienta de planificación que maneja

base de datos tipo Raster y que no se trabaja con un determinado tipo de información como por ejemplo, las propiedades dieléctricas del material de construcción de los edificios.

Si nos remitimos al entorno particular de una convergencia de vías como se muestra en la ilustración 5.16, existirá un rango de interés para determinar los parámetros. Un rango de interés es $\frac{\pi}{2} < \phi_2 < \pi$, para el cual se tiene a través de simulación, la relación que se muestra en la ilustración 5.17. Con base a dicha relación y a los análisis presentados anteriormente, son establecidos los siguientes nuevos parámetros:

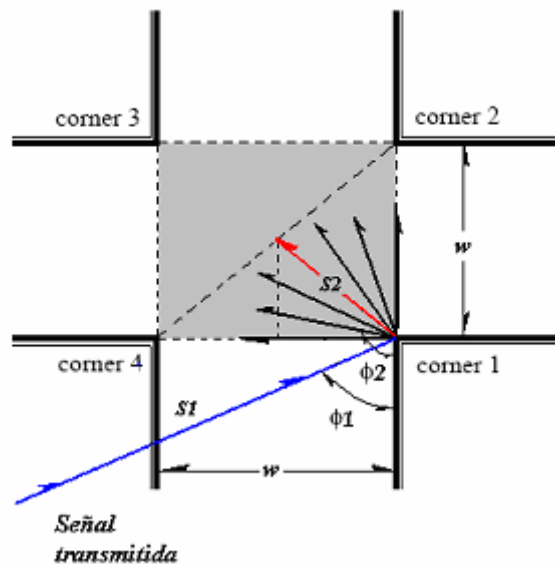


Ilustración 5.16 Área de una convergencia

$$\phi_1 \approx \psi \qquad \phi_2 = \frac{3}{4}\pi = 135^\circ$$

$$S_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} w \qquad S_1 \approx S \quad \text{para } S_1 \gg S_2$$

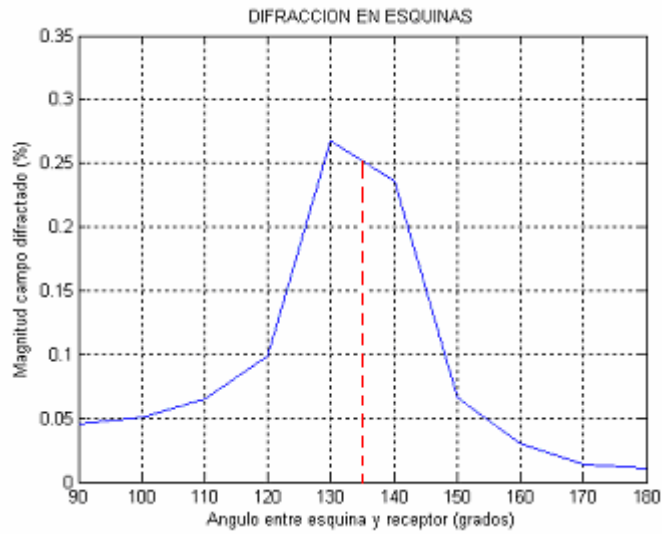


Ilustración 5.17. Campo difractado vs. ϕ_2 .

Con esto, la formulación UTD toma la forma:

$$e_{UTD} = e_0 \frac{e^{-jks}}{s} D \sqrt{\frac{s}{0.707ws + 0.5w}} e^{-j0.707kw} \quad (5.30)$$

$$e_{UTD} = \left[\frac{e_0}{s} D \sqrt{\frac{s}{0.707ws + 0.5w}} \right] e^{-jk(s+0.707w)} \quad (5.31)$$

$$D = \frac{e^{-j\pi/4}}{3\pi\sqrt{2\pi k}} \left\{ \begin{aligned} & \cot\left(\frac{7}{4}\pi - \psi\right) F\left(kLa^+\left(\frac{3}{4}\pi - \psi\right)\right) \\ & + \cot\left(\frac{\pi}{4} + \psi\right) F\left(kLa^-\left(\frac{3}{4}\pi - \psi\right)\right) \\ & + \cot\left(\frac{\pi}{4} - \psi\right) F\left(kLa^-\left(\frac{3}{4}\pi + \psi\right)\right) \\ & + \cot\left(\frac{7}{4}\pi + \psi\right) F\left(kLa^+\left(\frac{3}{4}\pi + \psi\right)\right) \end{aligned} \right\} \quad (5.32)$$

$$e_{UTD} = \left[\frac{e_0}{s} |D| \sqrt{\frac{s}{0.707ws + 0.5w}} \right] e^{-jk(s+0.707w+\frac{\pi}{4k})} \quad (5.33)$$

$$|D| = \frac{-1}{3\pi\sqrt{2\pi k}} \left\{ \begin{aligned} & \cot\left(\frac{7}{4}\pi - \psi\right) F\left(kLa^+\left(\frac{3}{4}\pi - \psi\right)\right) \\ & + \cot\left(\frac{\pi}{4} + \psi\right) F\left(kLa^-\left(\frac{3}{4}\pi - \psi\right)\right) \\ & + \cot\left(\frac{\pi}{4} - \psi\right) F\left(kLa^-\left(\frac{3}{4}\pi + \psi\right)\right) \\ & + \cot\left(\frac{7}{4}\pi + \psi\right) F\left(kLa^+\left(\frac{3}{4}\pi + \psi\right)\right) \end{aligned} \right\} \quad (5.34)$$

Donde w = ancho promedio de las vías, $k = \frac{\pi f}{150}$ y el término:

$$L = \frac{ws}{w + 1.414s} \quad (5.35)$$

$$a^\pm(\beta) = 2 \cos^2\left(\frac{2n\pi N^\pm - \beta}{2}\right) \quad (5.36)$$

Si $\beta = \frac{3}{4}\pi - \psi$ entonces:

$$a^+\left(\frac{3}{4}\pi - \psi\right) = 2 \cos^2\left(\frac{3\pi N^+ + \psi - \frac{3}{4}\pi}{2}\right) \quad \text{con} \quad N^+ = \frac{\frac{7}{4}\pi - \psi}{3\pi} \quad (5.37)$$

$$a^-\left(\frac{3}{4}\pi - \psi\right) = 2 \cos^2\left(\frac{3\pi N^- + \psi - \frac{3}{4}\pi}{2}\right) \quad \text{con} \quad N^- = \frac{-\frac{\pi}{4} - \psi}{3\pi} \quad (5.38)$$

Si $\beta = \frac{3}{4}\pi + \psi$ entonces:

$$a^+\left(\frac{3}{4}\pi + \psi\right) = 2 \cos^2\left(\frac{3\pi N^+ - \frac{3}{4}\pi - \psi}{2}\right) \quad \text{con} \quad N^+ = \frac{\frac{7}{4}\pi + \psi}{3\pi} \quad (5.39)$$

$$a^-\left(\frac{3}{4}\pi + \psi\right) = 2 \cos^2\left(\frac{3\pi N^- - \frac{3}{4}\pi - \psi}{2}\right) \quad \text{con} \quad N^- = \frac{\psi - \frac{\pi}{4}}{3\pi} \quad (5.40)$$

Expresando en dB tenemos:

$$E_{UTD} = 20 \log|s * e_{UTD}| \quad (5.41)$$

Como resultado, se obtiene un término para calcular la difracción de la señal en convergencias de vías conociendo los siguientes parámetros: la distancia de la convergencia al transmisor (S) y la orientación de la convergencia con respecto al transmisor (ψ). En un entorno de propagación *outdoor* se estaría hablando de la distancia de la convergencia de la vía a la base estación (BS) y la orientación de la convergencia con respecto a la BS.

La ilustración 5.18 muestra la relación entre el campo difractado en una convergencia de vías y los dos parámetros anteriormente mencionados. En ella se puede apreciar los puntos críticos en los cuales se incrementa la magnitud de campo difractado. Estos son los puntos singulares producto de la integral de Fresnel a los cuales se hacía referencia en el capítulo 4. Si se observa la ilustración 5.18, parecerá una aparente inconsistencia entre la gráfica y la barra de colores lo cual no es así, si no que sencillamente en los puntos singulares el cambio en magnitud es abrupto.

En la sección 6.5 del siguiente capítulo, se muestra como, a partir de la capa de información de alturas se determina si una posición dada de un receptor corresponde a un punto perteneciente a una convergencia de vías, si es así, se

identifica los parámetros de predicción (orientación y distancia de la convergencia con respecto a la posición del Transmisor), y se predice el nivel de señal difractada. Con esta consideración, se mejora el nivel de predicción en entornos característicos como lo son los cruces de vías.

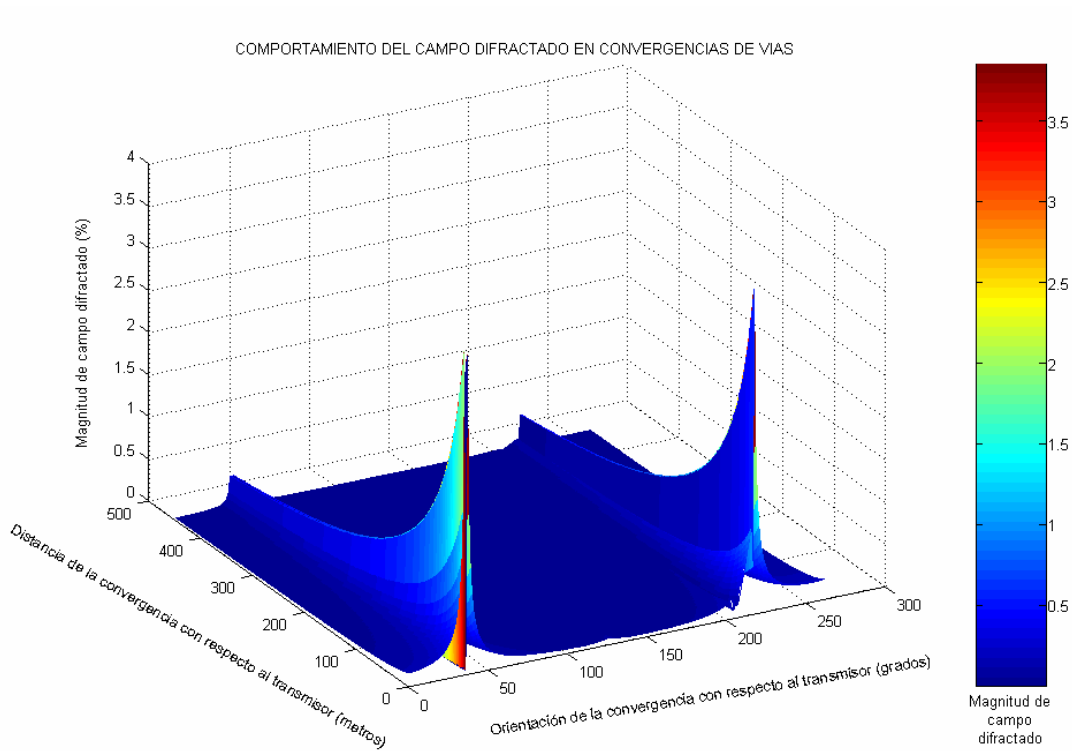


Ilustración 5.18. Magnitud de campo difractado vs ψ y S .

La ilustraciones 5.19 y 5.20 muestran la relación entre el campo difractado en una convergencia de vías y cada uno de los parámetros considerados en la predicción.

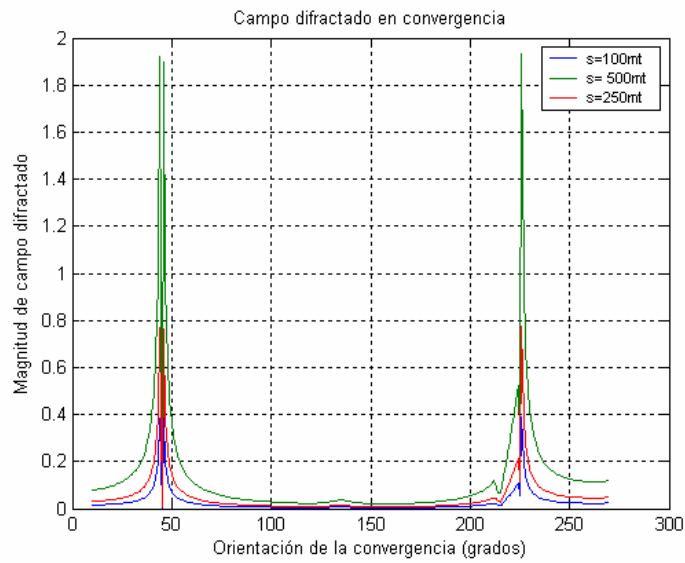


Ilustración 5.19. Magnitud de campo difractado vs ψ .

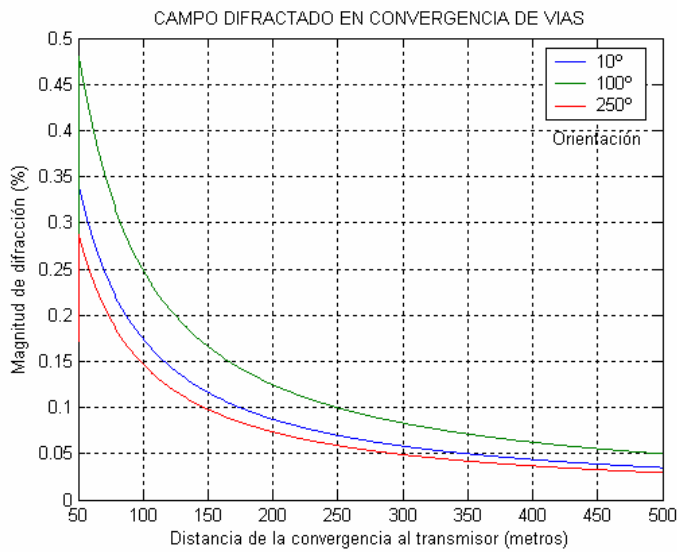


Ilustración 5.20. Magnitud de campo difractado vs S .

5.3 DIFRACCIÓN SOBRE OBSTÁCULOS EN TERRENO IRREGULAR.

La mayoría de las trayectorias o rutas que utilizan las señales de radio para propagarse contienen uno o más obstáculos a lo largo de la línea directa entre transmisor y receptor, que ocasionan un desvanecimiento en la magnitud de la

señal. Para calcular las pérdidas que ocasionan dichos obstáculos, se suele idealizar la forma del mismo. En la radio propagación existen dos técnicas muy conocidas que son: Difracción por filos de cuchillo y Difracción por cilindros. A continuación se presenta brevemente en que consiste cada una de ellas.

5.3.1 Difracción por filos de cuchillo.

En ésta aproximación, el obstáculo ya sea un edificio o una prolongación del terreno (i.e. colina), es aproximado a un filo de cuchillo, es decir el obstáculo es considerado como media pantalla absorbente, tal como se muestra en la ilustración 5.21. El mecanismo de difracción en este tipo de elementos representa un caso particular de la difracción por filos y esquinas para la cual se realizó un análisis en el capítulo 4.

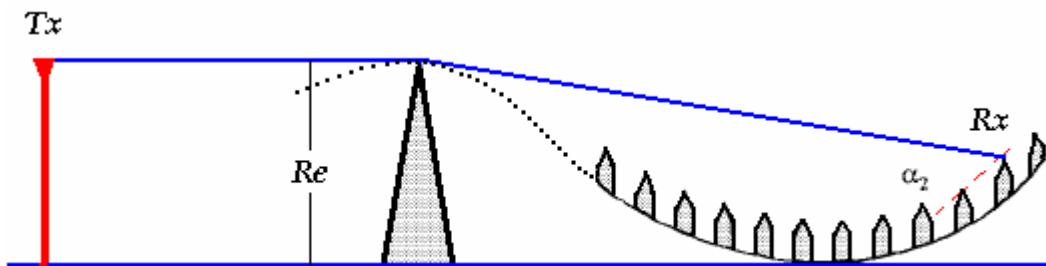


Ilustración 5.21 Esquema Básico de método de Difracción por filos de cuchillo.

Existen varias aproximaciones de filos de cuchillos, entre ellas se destaca el método de Deygout, la corrección de Causebrook y el método de Giovanelli⁴³. Sin embargo, para calcular las pérdidas por propagación sobre un entorno de terreno irregular, se suele emplear análisis de difracción múltiple mediante la Integral para Múltiples Filos de Cuchillos Difractores, empleada también en el

⁴³ S.R.Saunders and F.R. Bonar. "Prediction of Mobile Radio Wave Propagation Over Buildings of Irregular Heights and Spacings". *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, Vol.42, No.2, February 1994, pp.137-144.

desarrollo de modelos de propagación, como por ejemplo el modelo Walfisch-Bertoni⁴⁴ o el ya mencionado modelo COST231-Walfisch-Ikegami.

5.3.3 Difracción por cilindros.

La otra técnica que ha sido propuesta por Eliades⁴⁵, consiste en aproximar el obstáculo o elemento difractor mediante un cilindro, tal como se muestra en la figura 5.22.

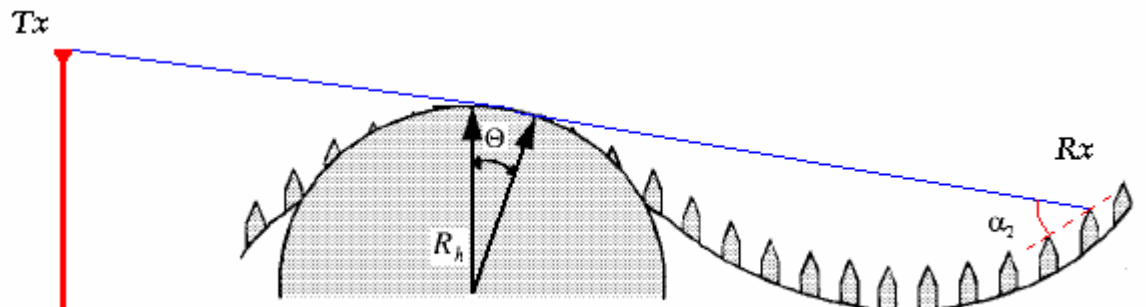


Ilustración 5.22 Esquema Básico del método de Difracción por Cilindros

En la Recomendación ITU-R P.526-8: Propagación por difracción, se establece algunos lineamientos para calcular la magnitud de campo difractado utilizando las dos aproximaciones mencionadas anteriormente.

5.3.3 Consideraciones planteadas por el Modelo Andino UIS[®] sobre la propagación en terreno irregular.

Los sistemas outdoors de microceldas diseñados para zonas urbanas poseen un radio de cobertura menor a un kilómetro de distancia. El hecho de que sea

⁴⁴ Joram Walfisch and Henry L. Bertoni, "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 36, No. 12, December 1988.

⁴⁵ Eliades D.E., *Terrain Simulation for the Cascaded Cylinder Diffraction Model*, IEE Proceedings-H, Vol., 140, N°4, August 1993.

una zona urbana, implica la existencia de una densidad de edificios por sector. La topografía de un terreno muy irregular (en el caso más crítico) generará una serie de obstáculos entre la línea de vista (LOS) de la estación base y el receptor móvil, lo mismo ocurre con la densidad de edificios. Sin embargo, cuando se analiza el perfil de una línea de vista, se observa que la altura de los obstáculos son el parámetro que implican que la primera zona de Fresnel sea o no obstruida y por lo tanto implican que existan o no pérdidas considerables en la intensidad de campo⁴⁶.

La altura de los obstáculos en un perfil la determina la posición del receptor, se habla entonces de una altura referenciada con respecto al receptor. Desde éste punto de vista, un obstáculo podría ser un edificio, una colina o una colina más el edificio. La ilustración 5.23 aclara este concepto.

Desde éste punto de vista y pensando en el diseño de un modelo para predecir pérdidas de propagación en una zona urbana, se puede afirmar que el mayor aporte a la predicción es establecido por la altura promedio de los obstáculos, además, como se establece en los análisis presentados por Lee⁴⁷, las variaciones de terreno dentro de un área menor a un kilómetro pueden ser omitidas sin incurrir en grandes rangos de errores.

Con lo anterior se plantea que la aplicación de la difracción múltiple por filos de cuchillo es acertada y que la implementación de la teoría de difracción de cilindros en una microcelda diseñada para un entorno urbano no presentará mejoras en la predicción, caso contrario para sistemas outdoors de macroceldas diseñadas para entornos rurales, en donde el radio de propagación supera las distancias de un kilómetro, y los efectos producidos por la topografía son mayores.

⁴⁶ Leonard Piazzzi and Henry L. Bertoni, "Effect of Terrain on Path Loss in Urban Environments for Wireless Applications", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 46, No. 8, August 1998.

⁴⁷ William C. Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*, USA: McGraw-Hill Book Company, 1997.

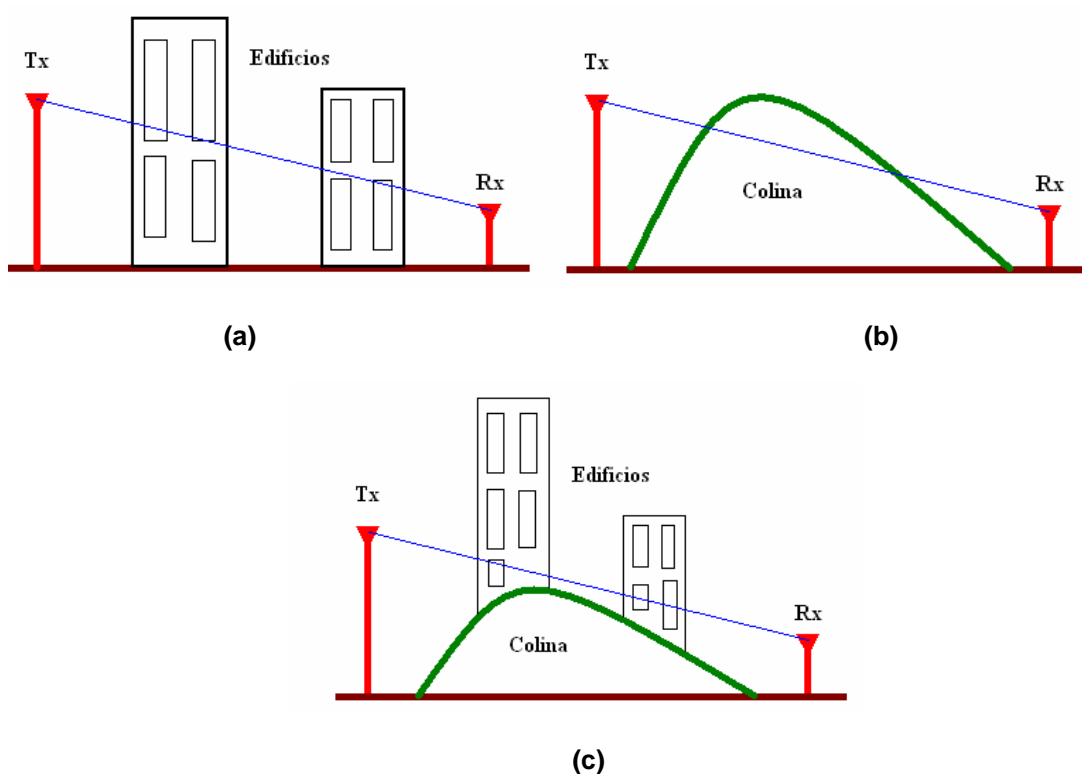


Ilustración 5.23 Son obstáculos aquellos elementos que interfieren en la línea de vista entre transmisor y receptor. (a) Edificios, (b) Prolongaciones de terreno o (c) la combinación de ambos.

En la implementación del modelo Andino UIS se utilizan alturas referenciadas con respecto a la altura del receptor para aplicar las formulaciones establecidas en el modelo COST231-Walfisch-Ikegami, las cuales a la vez fueron deducidas mediante la aplicación de la difracción por filos de cuchillo. Esto es descrito con mayor detalle en el capítulo siguiente.

5.4 FORMUACION DEL MODELO ANDINO UIS®

Al igual que el COST231-Walfisch-Ikegami, el modelo Andino UIS® distingue entre situaciones de línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS). En el caso de LOS la fórmula aplicada es:

$$L_b(dB) = -27.558 - 20\log(aux) + 20\log(f) \quad (5.42)$$

$$\text{Donde } aux = \frac{G_\theta}{r_1} \left(\cos\left(\frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) - j \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) \right) + \frac{G_\phi}{r_2} \sigma_m \left(\cos\left(\frac{2\pi r_2}{\lambda}\right) - j \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi r_2}{\lambda}\right) \right) \quad (5.43)$$

El parámetro aux permite que el modelo de propagación considere el patrón de radiación de la radio base (BS). Cada término es definido como sigue:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{h_{base} - h_{mobile}}{d} \right) \quad (5.44)$$

$$\varepsilon = 15 - j3\lambda \quad (5.45)$$

$$\sigma_m = \frac{\varepsilon \cdot \operatorname{sen}\alpha - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \alpha}}{\varepsilon \cdot \operatorname{sen}\alpha + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \alpha}} \quad (5.46)$$

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{d^2 + (h_{base} - h_{mobile})^2} \\ r_2 &= \sqrt{d^2 + (h_{base} + h_{mobile})^2} \end{aligned} \quad (5.47)$$

$$G(\theta, \phi) = G_\theta(\theta(s, \Delta h_{Mobile})) G_\phi(\phi) \quad (5.48)$$

Para $d \geq 0.02Kmt$, $800Mhz < f \leq 2000Mhz$, $4mt < h_{base} \leq 40mt$ y $1mt < h_{mobile} \leq 3mt$.

Para NLOS, el total de pérdidas están dadas por:

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd} + L_{cv} \quad (5.49)$$

Los términos L_0 , L_{rts} , y L_{msd} son tomadas del modelo de propagación COST231-Walfisch-Ikegami y son definidas nuevamente a continuación:

- Las pérdidas por espacio libre L_0 están dadas por:

$$L_0(dB) = 32.4 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (5.50)$$

Para d expresada en km y f expresada en MHz.

- Las pérdidas por difracción de múltiples filos de cuchillo antes del techo del edificio final L_{msd} son:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \text{Log}(d) + k_f \text{Log}(f) - 9\text{Log}(b) \quad (5.51)$$

Donde w es el ancho promedio de la vía en donde se encuentra el MS, Δh_{Mobile} es dado en metros.

- Las pérdidas ocasionadas por el techo del último edificio y un proceso de dispersión ocurrido a ésta altura L_{rts} son:

$$L_{rts} = -8.2 - 10\log(w) + 10\text{Log}(f) + 20\text{Log}(\Delta h_{Mobile}) + L_{Ori} \quad (5.52)$$

El término adicional considerado por el modelo de propagación Andino-UIS describe las pérdidas por difracción en las convergencias de vías L_{cv} , y son dadas por:

$$L_{cv} = 20\log|s * e_{UTD}(\psi, s)| \quad (5.53)$$

Donde $0 < \psi \leq 90^\circ$ y $0.1 < s \leq 1Km$. Hay que aclarar que $d \approx s$, luego $d \leq 1Km$. Estas condiciones son derivadas a partir de los análisis obtenidos en la sección 5.2.1. La constante $e_0 = 1$ ha sido determinada empíricamente con los ajustes realizados a partir de los datos muestrales derivados de las campañas de medidas, los cuales son presentados en el siguiente capítulo.

La validación de la formulación que acaba de ser expuesta, es llevada a cabo en los dos siguientes capítulos.

CAPITULO 6

HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN

Después de haber planteado el modelo de propagación Andino-UIS[®], se considera necesario verificar su validez de predicción, para ello, se requiere adaptarlo a una herramienta de planificación que permita simular la cobertura celular de una Radio Base en zonas particulares de la ciudad de Bucaramanga utilizando el modelo propuesto.

Para este propósito se elige la aplicación Cellview[®], basada en el software SIG de Arcview^{®48}, como herramienta de planificación debido a la experiencia adquirida en su manejo por parte del grupo de investigación RadioGIS. Actualmente se cuenta con más opciones, la herramienta ICS-Telecom[®] de la compañía francesa ATDI que corresponde a la herramienta de planificación que utiliza la compañía TesAmerica Andina Ltda. y la herramienta Atoll[®] de la casa francesa Forsk que es utilizada por el Grupo de Comunicaciones Móviles de la Universidad Politécnica de Valencia (los mismos creadores del CellView[®]). Ambas opciones pueden ser adquiridas por medio de un convenio de cooperación con dichas entidades.

Debido a la gran fuente de información que han proporcionando investigaciones anteriores sobre la herramienta de planificación utilizada en el presente trabajo⁴⁹, solo se hará una breve descripción de la misma. En cambio, se presenta la metodología utilizada para la creación de los mapas digitales, elemento que junto con los modelos de propagación, hacen posibles las simulaciones.

⁴⁸ ArcView 3D Analyst: 3D Surface Creation, Visualization, and Analysis: *Environmental Systems Research Institute, Inc.*, U.S, 1997. ArcView Spatial Analyst: Advanced Spatial Analysis Using Raster and Vector Data: *Environmental Systems Research Institute, Inc.*, U.S, 1996.

⁴⁹ Martha Prieto, Fideligna Gallo. *Análisis de irradiación electromagnética en las inmediaciones de una radio base sectorizada bajo condiciones andinas*. Universidad del Valle. Colombia 2004.

6.1 GENERALIDADES SOBRE SOFTWARE DE SIMULACIÓN.

6.1.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Una herramienta de planificación móvil, basada en Sistemas de Información Geográfica, tiene como finalidad diseñar y planear redes inalámbricas, especializando sus funciones en los algoritmos de propagación, los análisis de Interferencia, de suscriptores y de tráfico, y típicamente utilizan salidas graficas que permiten un despliegue de mapas con elementos de referencia para presentar los resultados, no obstante la mayoría de estas herramientas tienen funciones limitadas para el despliegue de diferentes capas de información y para la administración de la misma. Por esta razón se vuelve muy conveniente complementar una herramienta de simulación con la utilización de Sistemas de Información Geográfica -SIG- que puedan importar los resultados de las simulaciones, integrarla con otras capas de información y administrarla por medio de bases de datos, para que de esa forma se pueda hacer una gestión eficiente de la información y se generen los diferentes reportes que se requieran. Algunos ejemplos de GIS son el *ArcGIS*, *Arcview* y *Arcinfo* de *ESRI*, *Geomedia* de *Intergraph*, *Erdas*, *Autodesk* y *MapInfo*.

Lo más importante de un SIG es la potencialidad de sus funciones de análisis espacial y la capacidad que tiene de producir nueva información como resultado de la conexión lógica de información de la base de datos. Por medio de un SIG se pueden visualizar relaciones complejas entre los datos, tales como kilómetros de carretera cubiertos por una radio base ó población cubierta por un sector ó la relación entre zona de servicio y población atendida. Adicionalmente la base de datos puede almacenar información administrativa necesaria para la Gestión de la infraestructura, cantidad y tipo de equipos, número de mantenimientos, tiempo de garantía de los equipos y fecha de vencimiento de la misma, frecuencias y tipo de antenas instalada en cada lugar etc. Utilizando un SIG se puede realizar una búsqueda selectiva de información que puede ser visualizada en forma espacial, como por ejemplo visualizar

geográficamente los sitios en donde hay enlaces de 7GHz. De una marca determinada para así realizar una campaña de mantenimiento.

6.1.2 CARTOGRAFÍA DIGITAL PARA TELECOMUNICACIONES.

La información cartográfica es un elemento fundamental en la gestión y el uso de las redes inalámbricas.

La producción de cartografía requiere transformar datos de diferentes formatos, incluyendo imágenes de referencia (mapas, fotografías por satélite, imágenes aéreas, etc.), y producir otros datos como Modelo Digital de Terreno (DTM), Modelos Digitales de Ciudad (DCM) y usos del suelo (clutter), que constituyen básicamente los tipos de modelos digitales utilizados en las plataformas de Diseño y Simulación de Redes Inalámbricas a fin de realizar los estudios de planeación, y optimización. En la Ilustración 6.1 presenta el ejemplo del mapa digital de un sector de Bogotá.

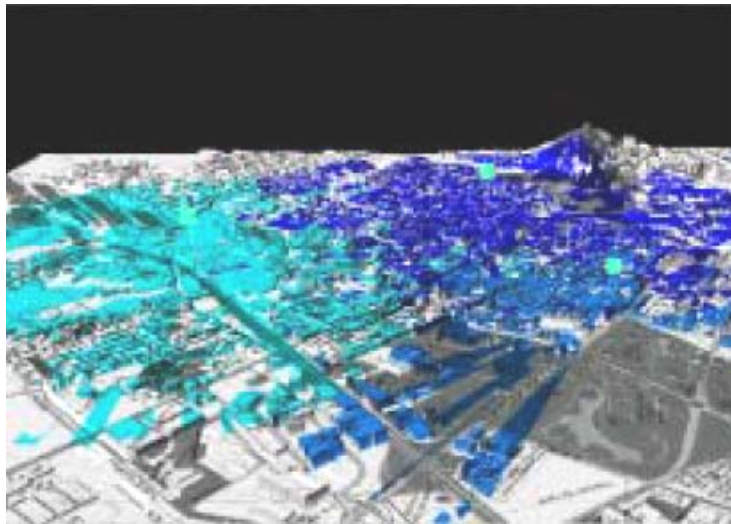


Ilustración 6.1. Simulación desde Cerro Suba (Bogotá – Colombia).Cortesía TESAMERICA Andina Ltda.

6.1.2.1 Modelos Digitales de Terreno (DTM): Tienen como fin describir en forma tridimensional una porción de la superficie terrestre, utilizando el trazado de curvas de nivel. Esta información se utiliza para el diseño de redes inalámbricas en zonas rurales.

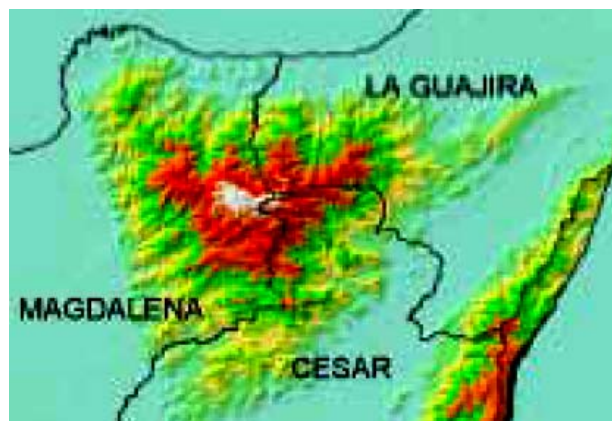


Ilustración 6.2. Mapa digital de terreno. Cortesía TESAMERICA Andina Ltda.

Proceso de construcción de los Modelos Digitales de Terreno (DTM)

Información Fuente: Los DTM se elaboran a partir de planchas que vienen en formato análogo (en papel) o en formato digital (imagen). El DTM de zonas urbanas se extrae a partir de la restitución fotogramétrica que se hace sobre imágenes aéreas de la ciudad; este proceso se describirá más adelante.



Ilustración 6.3. Muestra de una plancha análoga

Proceso: El procesamiento digital de los DTMs comienza con la digitalización de las curvas de nivel trazadas en las planchas originales. El archivo resultante de tipo vectorial, contendrá un conjunto de líneas cada una con una asignación de altura determinada.

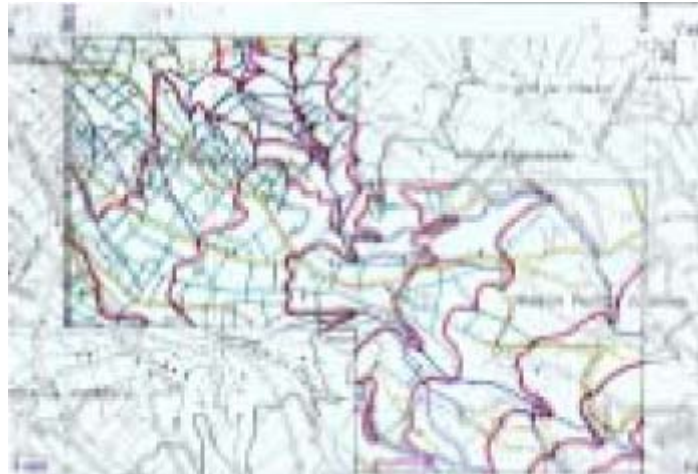


Ilustración 6.4. Digitalización de información análoga

Después de digitalizar cada plancha, se inicia un proceso de empalme entre planchas adyacentes, en donde se debe unir cada curva de nivel con su correspondiente vecina. Es en este proceso donde la construcción de un DTM a nivel nacional requiere de un gran tiempo en su construcción.

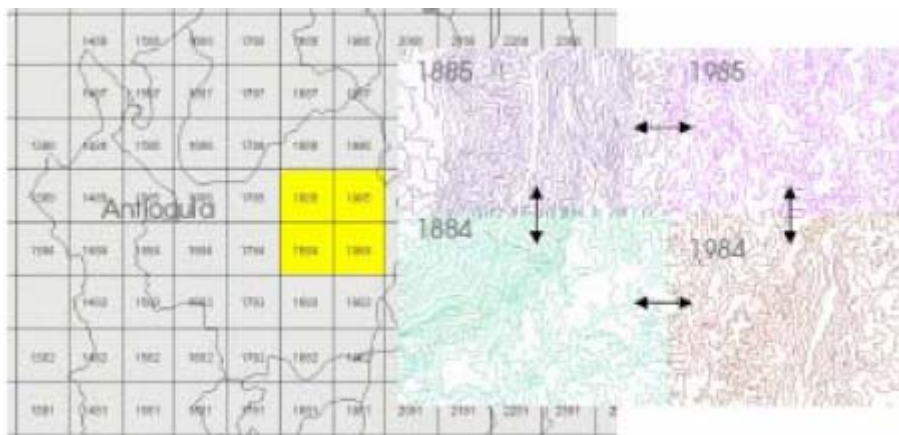


Ilustración 6.5. Digitalización de información análoga

Finalizando el proceso de empalme, la zona total se convierte en un archivo Raster, conocido como Grilla. La grilla se exporta al formato requerido por la plataforma de simulación de redes inalámbricas específica (ya sea CellView, ICS, Atoll, etc.).

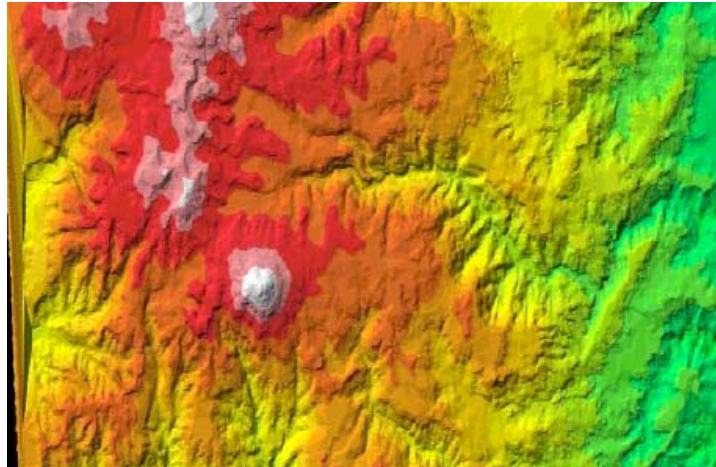


Ilustración 6.6. Simulación final del terreno

Dependiendo de la Herramienta de Simulación un DTM se puede transformar en cualquier formato, los más típicos son:

- ICS Telecom©
- Planet©
- Pathloss©
- EDX©
- Formato estándar ASCII
- Formato GRID

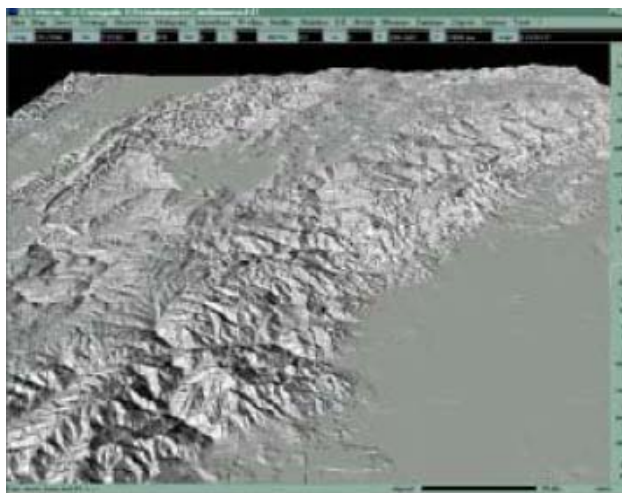


Ilustración 6.7. Terreno cargado en ICS-Telecom©

En la actualidad la mayor parte de las Herramientas pueden importar cartografía a partir del Formato estándar ASCII, por consiguiente siempre es importante contar con este tipo formato.

Resolución: La resolución requerida de un DTM está definida por las características de las señales inalámbricas que se van a simular, ya que no se requiere la misma resolución para simular una señal de TV que una de LMDS en 28GHz. La resolución esta determinada por los intervalos entre curvas de nivel definidos en la información fuente, estos intervalos tienen valores típicos de 100 m, 80 m, 40 m, 25 m, 20 m y 2 m dependiendo de la escala del mapa que se maneje. Es así que para señales de Radio y TV una resolución entre 100 m y 50 m es deseable, para comunicaciones celulares una resolución de 50 m o mejor incrementa sustancialmente la precisión de las simulaciones en zona rural y adicionalmente permite utilizar el modelo para estimar líneas de vista de la red de transporte.

6.1.2.2 Modelos Digitales de Ciudad (DCM):

Superponen el terreno con las alturas de las edificaciones. Su aplicación es el diseño y simulación de redes inalámbricas de carácter urbano.

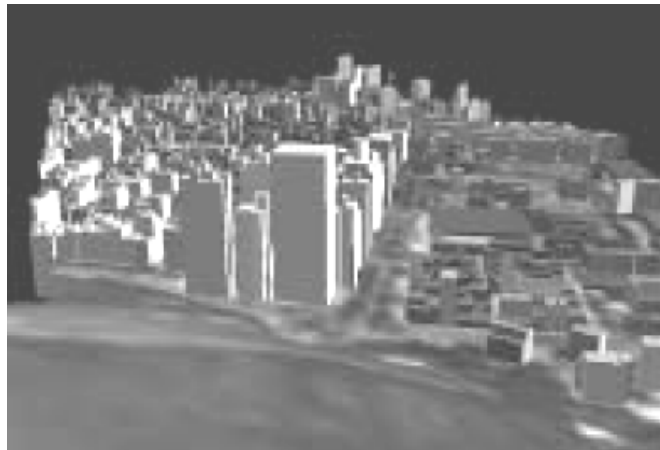


Ilustración 6.8. Detalle Ciudad de Bogotá Cll 100 Cra 7ª. Cortesía TESAMERICA Andina Ltda.

Proceso de construcción de los Modelos Digitales de Ciudad (DCM)

Información Fuente: Un DCM inicia con la consecución de fotografías aéreas de la zona a trabajar, estos negativos se procesan digitalmente a resoluciones iguales o mejores que 125 micrones, esta información con sus respectivos

puntos de control se procesan en computadores con software especializado en fotogrametría digital.

Proceso: Las fotografías aéreas se someten a un proceso llamado restitución fotogramétrica, en donde cada imagen es orientada y alineada con sus vecinas de tal forma que se arma un mosaico de imágenes que cubre toda la zona de interés, en este caso zona urbana.



Ilustración 6.9. Detalle Ciudad de Bogotá Cll 100 Cra 7ª. Cortesía **TESAMERICA Andina Ltda.**

Posteriormente las fotografías se rectifican eliminando al máximo las distorsiones angulares, dando como resultado un producto denominado Ortofotografía. Sobre la Ortofotografía se inicia el proceso de modelamiento de elementos, en donde no solo se delimitan las cuadras sino cada una de las construcciones y objetos elevados de construcción, asignando a cada uno de ellos un polígono y su altura correspondiente.

Se le debe dedicar una especial atención a los elementos construidos sobre las terrazas de los edificios altos, tales como, cuartos de equipos, cuartos de ascensores o en general obstáculos que puedan afectar la primera zona de *Fresnel* en el momento de una simulación o línea de vista. Después de la vectorización se genera el DCM y se convierte al formato requerido por la plataforma de Simulación de Redes Inalámbricas, con lo cual se puede realizar en forma confiable líneas de vista, simulaciones de cubrimiento, *Frequency Hunting*, etc.

Resolución: La resolución en los DCM es típicamente de 1 metro, debido al grado de resolución que se logra en una fotografía aérea. Esta resolución es requerida para el diseño de Redes LMDS y de último Km.

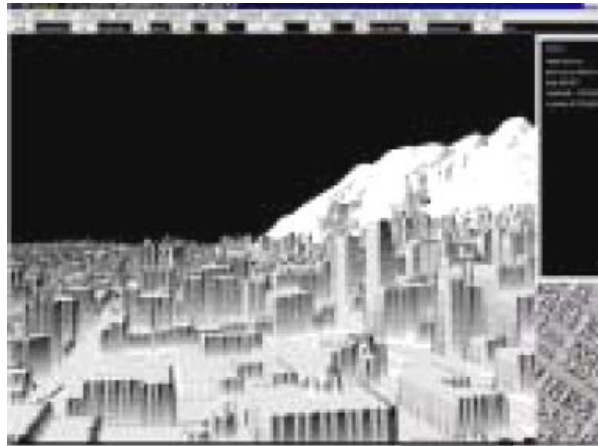


Ilustración 6.10. Muestra en 3D de Bogotá en ICS-Telecom©. Cortesía **TESAMERICA Andina Ltda.**

6.1.2.3 Clutters.

Los modelos digitales se acompañan por los Clutters de la zona correspondiente, un Clutter es la clasificación de los elementos sobre el terreno que afectan la propagación, estos se clasifican por zonas de acuerdo a la pérdida que introducen en dB.

Cada plataforma de simulación de redes inalámbricas maneja una clasificación diferente, por consiguiente a los Clutter se les asignan números que son tenidos en cuenta por la plataforma, la que a su vez les asigna un valor de pérdidas en dB. En la Ilustración 6.11 presenta un ejemplo de Clutters de Cundinamarca.

La clasificación varía si se está trabajando sobre una zona urbana o una zona rural. Su resolución está determinada por la resolución del modelo digital que está cubriendo.

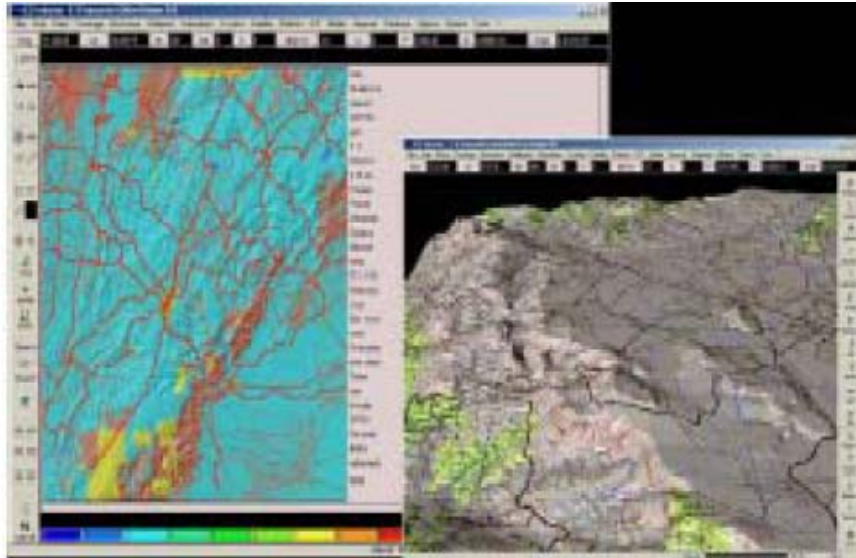


Ilustración 6.11. Ejemplo Clutters de Cundinamarca.

Vectores y Textos.

Rural: Los vectores están constituidos por la malla fluvial y vial, por los límites departamentales y municipales. Los textos están determinados por los nombres de departamentos, municipios, veredas y algunos nombres de accidentes geográficos importantes.

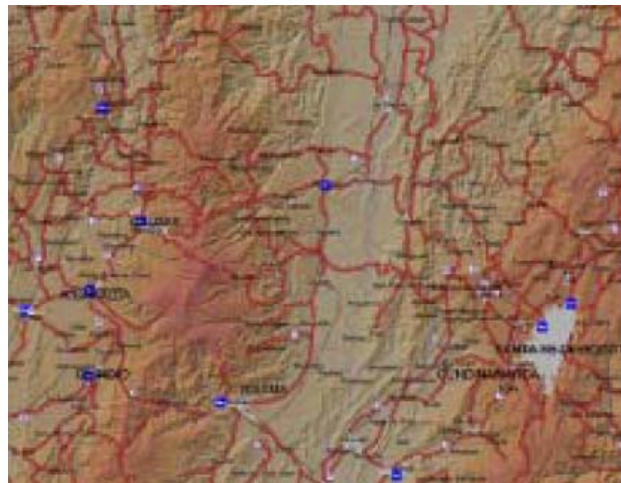


Ilustración 6.12. Muestra de vectores y textos en el Eje Cafetero

Urbano: Los vectores están constituidos por la malla vial, ríos y canales presentes dentro del área urbana. Los textos pueden resaltar los nombres de algunas edificaciones importantes y algunos nombres de vías y calles relevantes para la ubicación visual de las estaciones de transmisión.

6.1.3 PROCESOS INVOLUCRADOS EN UNA SIMULACIÓN.

Como se mencionó previamente las herramientas de simulación de propagación para planeación y diseño de redes inalámbricas son cada vez mas utilizadas por la reducción de costos de las mismas, debido principalmente a la gran oferta de este tipo de software corriendo sobre plataforma Windows en PC de escritorio.

Existen herramientas de aplicación genérica, es decir que se utilizan para diseñar una amplia gama de redes inalámbricas de diferentes tipos y a diferentes frecuencias y existen otras de aplicación específica, es decir diseñadas para una frecuencia y sistema en particular, como por ejemplo las utilizadas para las redes de telefonía móvil celular.

La principal diferencia entre una herramienta de tipo genérico y de aplicación particular consiste en el número y tipo de algoritmos con que están equipadas, es de esperarse que una herramienta de tipo genérico cuente con una amplia gama de algoritmos de propagación que cubran todas las bandas de frecuencias, pero de igual forma no tendrá funciones específicas y personalizadas como las de una herramienta de aplicación específica, la mayoría de las herramientas utilizan algoritmos semideterminísticos.

Por otra parte y como se ha mencionado previamente el principal insumo de una herramienta es la cartografía digital, esta debe estar enfocada para telecomunicaciones teniendo en cuenta la clasificación de los "clutter" descritos previamente.

El tipo de cartografía que se requiera para una herramienta de simulación esta determinada por el tipo de sistema que se va a diseñar. La resolución requerida para diseñar una red Broadcast en VHF puede ser de 80 m y aquella requerida para diseñar una red LMDS en la banda de 28 GHz debe ser de resolución de 1m.

La resolución de la cartografía tiene una relación directa con el costo de la misma, a mayor resolución mayor costo, archivos más grandes y mayor tiempo de proceso, pero cómo saber que tipo de resolución se requiere, para ello es importante conocer el proceso de una simulación.

- ♦ *Localización de la Radio Base* en el mapa digital (la precisión de la localización es importante).
- ♦ *Obtención de perfiles* en forma radial teniendo como origen la BS a un radio predeterminado. La separación entre los perfiles es importante para la precisión de la simulación.

Radiolocalización, que sirve para conocer la posición de un receptor móvil

6.1.4 GEOREFERENCIACIÓN Y PROYECCIÓN DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS.

En un Sistema de Información Geográfica la información temática que se utilice en un proyecto debe coincidir perfectamente a nivel espacial para poder establecer relaciones.

Es importante para una correcta superposición que la información espacial esté georreferenciada con el mismo sistema de proyección y de coordenadas.

6.1.4.1 Proyecciones cartográficas

Una proyección cartográfica es una fórmula matemática que permite representar la forma curva de la tierra en un plano. Este proceso inevitablemente distorsiona al menos una de estas propiedades –forma, área, distancia, dirección- y a veces más.

Para solucionar estos problemas se han desarrollado diferentes proyecciones. Se proyecta la esfera terrestre sobre una superficie desarrollable que puede ser tangente o secante a la esfera. Cada una de estas proyecciones difiere en la forma en que maneja el área, la forma, la distancia y la dirección.

Algunas de las proyecciones más simples son realizadas mediante figuras geométricas, como conos y cilindros.

Proyecciones cónicas

El plano de proyección es un cono tangente o secante a la esfera

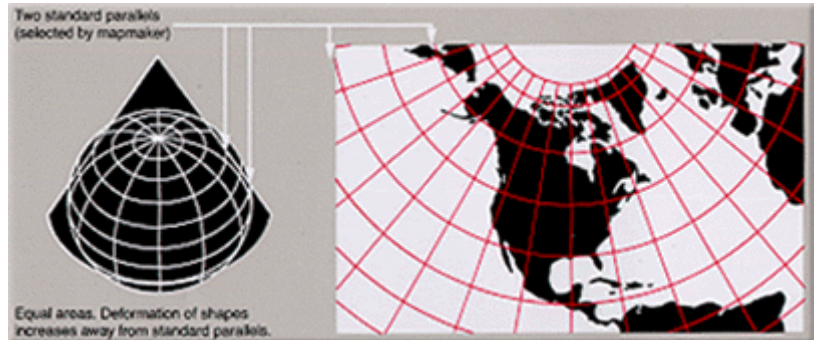
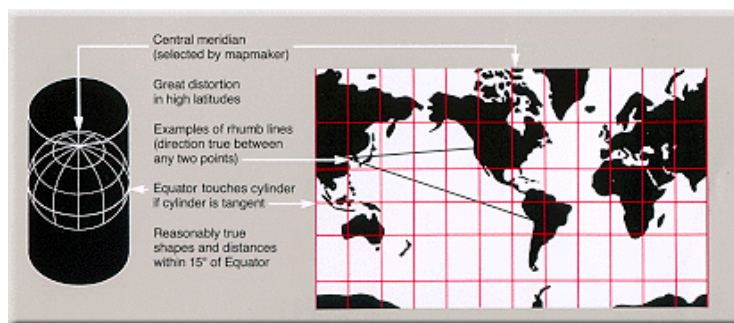


Ilustración 6.13. Proyecciones Cónicas

Proyecciones cilíndricas

El plano de proyección es un cilindro generalmente tangente a la esfera a lo largo de un círculo máximo. La Proyección Mercator es una de las proyecciones cilíndricas más comunes. Las proyecciones cilíndricas pueden ser de tres tipos:



Proyección normal:

El Ecuador es la

línea tangencial.

Ilustración 6.14. Proyección Normal

Proyección Transversa:

Los meridianos son las líneas tangenciales. El meridiano central se ubica en la zona que se va a trabajar, lo que permite minimizar las distorsiones en esa región.

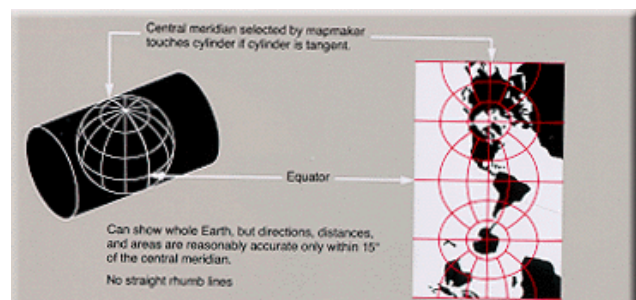


Ilustración 6.15. Proyección Transversal.

Como los meridianos se ubican en sentido norte-sur esta proyección es utilizada donde las dimensiones norte-sur son mayores a las este-oeste.

Proyección oblicua:

Los cilindros son rotados de acuerdo a una gran línea circular localizada en algún lugar entre el ecuador y los meridianos

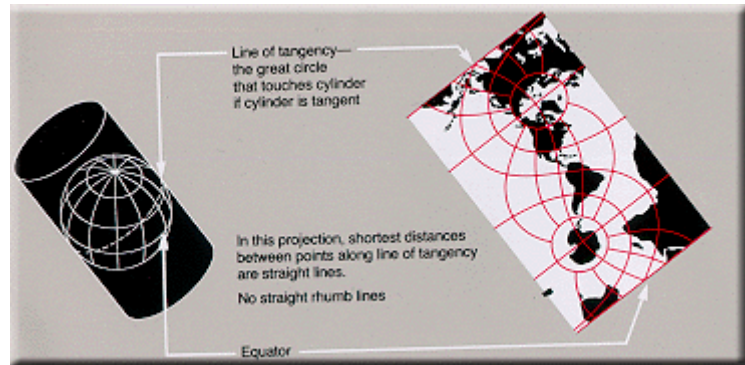


Ilustración 6.16. Proyección Oblicua.

6.1.4.2 Sistemas de Coordenadas

Un sistema de coordenadas especifica las unidades utilizadas para localizar elementos en un espacio y el punto de origen de esas unidades.

Sistema de coordenadas esféricas o geográficas

En el sistema esférico todas las líneas horizontales son llamadas líneas de latitud o paralelos y las verticales líneas de longitud o meridianos, el conjunto de estas líneas forman una grilla.

El eje horizontal es el Ecuador y el eje vertical es Meridiano de Greenwich. El origen de esta grilla se encuentra en la intersección de estos ejes. De acuerdo a este origen la tierra es dividida en cuatro cuadrantes, por encima y por debajo del Ecuador encontramos el norte y el sur y a la derecha y a la izquierda, este y oeste.

Latitud y longitud son medidas tradicionalmente en grados, minutos y segundos. En el caso de la latitud el Ecuador se encuentra a los 0° , el Polo Norte a los 90° y el Polo sur a los -90° . Para la longitud el Meridiano de Greenwich corresponde a los 0° , y las longitudes son medidas en forma

positiva hacia el este hasta los 180° y en forma negativa hacia el oeste hasta los -180° .

Sistema de coordenadas planas

Debido a que resulta difícil realizar mediciones en un sistema de coordenadas esféricas, la información geográfica se proyecta en un sistema de coordenadas planas.

Las localizaciones son identificadas por coordenadas x , y en una grilla. Cada posición tiene dos valores que están en relación con la localización central, una especificando su posición horizontal y la otra su posición vertical.

La ventaja de los sistemas planos es que las medidas de longitud, ángulos y áreas son constantes a lo largo de las dos dimensiones.

6.1.4.3 Algunos sistemas de proyección

Universal Transverse Mercator

Es uno de los sistemas más utilizados a nivel mundial. UTM utiliza un sistema de proyección Transverse Mercator y divide el planeta en 60 zonas, de 6° cada una. Cada zona tiene su meridiano central a partir del cual se extiende 3° hacia el este y 3° hacia el oeste. El origen para cada una de las zonas es el Ecuador y su meridiano central. Para evitar valores de coordenadas negativas se asigna un valor al meridiano central (falso este) y un valor al Ecuador (falso norte). El falso este es de 500000.

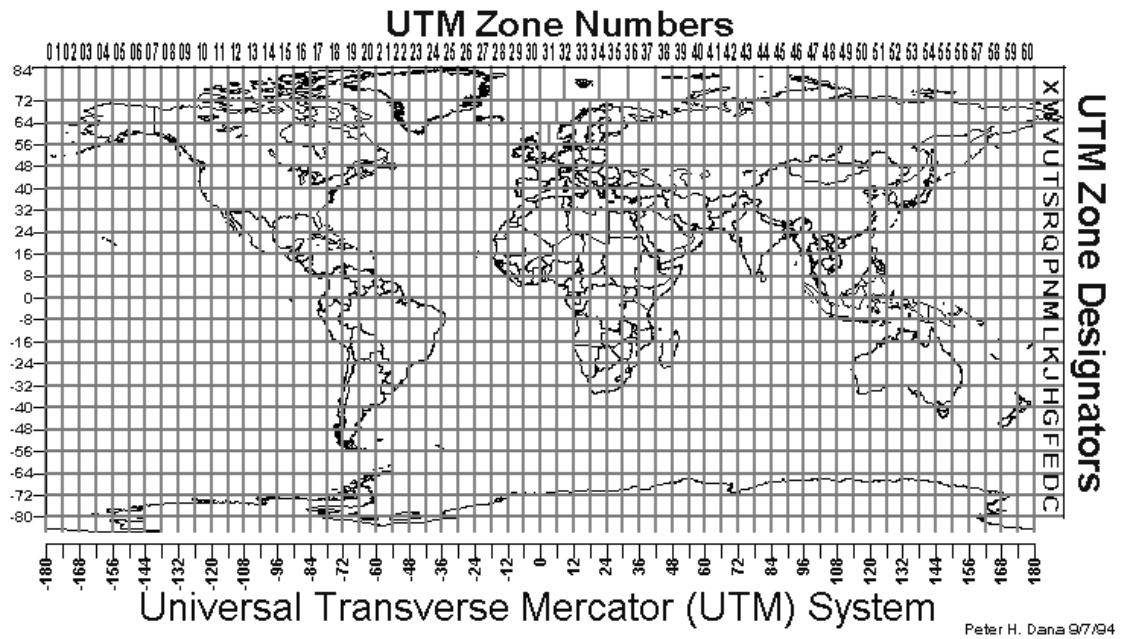


Ilustración 6.17. Marcador Transversal Universal.

El centro de la tierra identificado por la posición x , y , z en un plano en 3D se le conoce como el “Geocentro”, el Datum es un valor x' , y' , z' referenciado al Geocentro, adicionalmente la tierra se puede modelar por medio de un elipsoide, de estos existen varios tipos como Elipsoide de Clarck, Elipsoide Internacional, etc. Utilizar uno u otro depende de la conveniencia que represente el elipsoide en el área de interés.

Un punto en la tierra se debe expresar definiendo un Datum y el elipsoide utilizado como modelo. Un Datum WGS84 (World Global System 1984) elipsoide Internacional denota claramente una diferencia con un Datum Bogotá elipsoide de Clark, en los 2 casos la posición se reporta por medio de los grados y minutos de la Latitud y Longitud pero consecuentemente con lo expuesto presentarán diferencias numéricas.

En forma Genérica se habla de WGS84 y Datum Bogotá, significando no solo el Datum sino también los elipsoides arriba señalados.

Los datos que arroja un GPS de latitud y longitud en grados para Georeferenciar un sitio, es decir para definir la posición del sitio sobre la tierra

son insuficientes si no se especifica el Datum con el que dichos valores fueron adquiridos.

El GPS deberá programarse al Datum que corresponda al utilizado por la cartografía en donde se va a localizar el punto medido.

Adicionalmente, para representar un punto de la tierra sobre un plano x, y se debe realizar una proyección, para realizar la proyección existen diferentes modelos, el más utilizado es el modelo cilíndrico con posición transversal

El WGS84 elipsoide Internacional Proyección UTM (Universal Transversal of Mercator) es el más utilizado a nivel mundial.

Cada vez que se especifiquen coordenadas de un punto, se deberá indicar el Datum con el que se obtuvieron y al proyectar el punto sobre un plano se debe tener en cuenta la proyección que utiliza el plano.

6.2 HERRAMIENTA DE PLANIFICACIÓN CELLVIEW[®] SOBRE ARCVIEW 3.1

ArcView[®] es una herramienta desarrollada por la empresa estadounidense ESRI. Con ella se pueden representar datos georreferenciados, analizar las características y patrones de distribución de esos datos y generar informes con los resultados de dichos análisis.

El entorno de desarrollo del sistema de información (GIS) ArcView[®] consiste en un lenguaje de programación orientado a objetos y una interfaz gráfica para la personalización. La interfaz gráfica, incluye la Caja de Diálogo de Personalización (Customize) y el Editor de Scripts, que le permiten escribir, ejecutar y depurar el código de Avenue y la personalización de la interfaz de usuario gráfica standard (GUI), mientras trabaja en el entorno de desarrollo familiar de ArcView[®].

Cellview[®] es una aplicación desarrollada sobre la plataforma ArcView[®], por el Grupo de Comunicaciones Móviles (GCM) del Departamento de

Comunicaciones (DCOM) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Desarrolla análisis en campo de las radiocomunicaciones relacionadas con las Comunicaciones Móviles, entre las que se pueden englobar el cálculo de coberturas de potencia, la obtención de algoritmos de propagación adecuados tanto para entorno urbanos como rurales, estudios para las diferentes generaciones de la telefonía móvil, análisis de radioenlaces para niveles superiores en la jerarquía de red, entre otras.

Posee una gran versatilidad, en cuanto a la representación de los mapas (tanto urbanos como rurales) que son uno de los más importantes puntos de partida de las funciones que componen el programa. Así mismo, se dispone de la gran ventaja que suponen los distintos formatos de representación de los resultados, como son los grids de potencia o los grids de best-server.

Un grid es un formato de datos de ArcView, en el cual la información se relaciona con una imagen dividida por una cuadrícula. A cada elemento de la cuadrícula se le asocia un valor correspondiente a la información que represente el tema. Este tipo de datos, permite que se puedan obtener muchos resultados tratando cada grid (suponer una cobertura de potencia) como un elemento único, además de poder obtener el valor de cada uno de sus elementos por separado.

Las aplicaciones de ArcView[®] personalizadas se crean con los scripts de en un lenguaje propietario llamado Avenue[™]. Los scripts se escriben, compilan, testean y depuran desde el documento del Editor de Scripts de ArcView.

6.3 HERRAMIENTA DE PLANIFICACIÓN ICS-Telecom DE ATDI

6.3.1 Descripción general:

ICS -Telecom es una herramienta de planificación utilizada en el diseño de redes en entornos *indoors* y *outdoors* a través de perfiles LOS/NLOS. Es capaz de evaluar el grado de servicio para voz, datos y servicios mixtos e incluye servicios avanzados como voz sobre IP, banda ancha personalizada etc.

Abarca múltiples tecnologías para planificación radio y gestión técnica del espectro.

ICS telecom optimiza la ocupación del espectro mediante un motor de asignación automática de frecuencias. Permite también la reutilización de frecuencias y minimiza las interferencias. El módulo de asignación de frecuencias utiliza tanto el C/I (relación portadora a interferencias) como los métodos de degradación del umbral.

Conectado a un servidor, ICS telecom recibe actualizaciones a tiempo real a través de una conexión LAN de diferentes entidades clientes.

Multi-sistema orientado a simular convergencias de tecnologías para la planificación futura asegurando la transmisión de datos. Maneja archivos específicos para edificios extraídos del Modelo Digital de Elevación.

ICS-Telecom emplea modelos digitales de terreno para simular efectos de comunicación con una visualización dinámica en 2D y 3D, con un rango de frecuencias de 10kHz a 450 GHz. ICS gestiona cinco capas cartográficas necesarias para el cálculo de propagación y la visualización:

- Modelo Digital de Elevación / Modelo Digital de Terreno – Imágenes rasterizadas (archivos tipo ráster).
- Archivos de clutter
- Archivos de edificios
- Archivos vectoriales

6.3.2 Funcionalidades Generales:

Definición de estaciones: El usuario indica el tipo de estación y los parámetros técnicos necesarios (ubicación, altura sobre el terreno, potencia, ganancia, pérdidas, modelos de antena); todas las estaciones de la red aparecen de forma instantánea en el mapa integrándose en una base de datos interna o externa para la realización de posteriores estudios.

Parámetros de cálculo: Este sistema integra varios modelos de propagación (Fresnel, Deygout 94, Okumura-Hata, ITU-R.P.370, ITU-R.P.525/526, Longley-Rice, NBS 10), no obstante el usuario también puede crear y personalizar su propio modelo de propagación (en este caso el modelo Andino UIS). Este cálculo incorpora propagación en espacio libre, difracción (Bullington, Deygout, Cilindro ITU-R.526, ITU 45), refracción y reflexión. ICS telecom también tiene en cuenta las interacciones físicas, como los edificios, la curvatura del globo terrestre, la atenuación climática y la atenuación lineal de usos del suelo.

Cálculo de cobertura: La cobertura se calcula para cada uno de los puntos del terreno, mostrándose el resultado en mapas bidimensionales o tridimensionales. El usuario dispone de acceso inmediato a cobertura compuesta, cobertura de mejor servidor, solapamiento y handover entre estaciones, pudiendo realizar todos los estudios que sean necesarios.

Optimización del espectro y cálculos de interferencias: El sistema asigna frecuencias de forma automática, optimiza la ocupación del espectro, reutilizando frecuencias cuando sea posible (según el rango de frecuencias o la lista de frecuencias que indique el usuario), minimizando a su vez la interferencia.

Diseño: Para mejorar la configuración de la red, incluye la búsqueda automática de emplazamientos a partir del grupo de ubicaciones (suscriptores o zonas) que han de cubrirse.

Radioenlaces: Extrae de forma instantánea el perfil del terreno localizado entre dos estaciones (teniendo en consideración la curvatura del globo terrestre, los usos del suelo o las limitaciones locales). Se generan los balances de enlace para enlaces por microondas analógicos o digitales, según los modelos predefinidos de propagación, difracción y reflexión. ICS telecom proporciona información sobre la calidad de la recepción y la fiabilidad del enlace. El módulo de asignación automática de frecuencias contribuye a reducir las interferencias

que se producen dentro de la red de radioenlaces, así como entre los enlaces y otras estaciones, como receptores de satélite o estaciones fijas WLL o GSM.

Administración de bases de datos: Utiliza bases de datos internas que permiten la administración instantánea de todos los emplazamientos que sean necesarios. ICS telecom integra como estándar la posibilidad de conectarse a fuentes externas mediante una red existente de ámbito local o lejano (importación y reutilización de bases de datos existentes así como intercambio de información técnica a gran escala).

Administración del espectro: Se integra con facilidad en un Sistema de administración del espectro para ayudar a la adjudicación de licencias, la compatibilidad electromagnética o la coordinación fronteriza. ICS telecom integra importantes recomendaciones de la ITU relativas a la administración del espectro. También puede conectarse directamente a goniómetros o analizadores del espectro mediante puerto RS232 e integrarse en un departamento de control del espectro. Este sistema recibe en tiempo real la información procedente de los goniómetros, guarda los resultados y los muestra en la cartografía. A continuación, compara de forma automática la probable ubicación con la base de datos de emplazamientos conocidos para determinar el propietario potencial del transmisor.

Planificación tridimensional de redes de radio

Imagen tridimensional en pantalla que muestra la cobertura desde dos transmisores y un enlace entre dos emplazamientos de microondas, la ilustración 6.18 presenta un ejemplo. En modo tridimensional, los usuarios disponen de la capacidad de visualizar un proyecto desde cualquier ángulo y altura, pudiendo acercarse y alejarse del proyecto, quedando dicha capacidad únicamente restringida por la resolución del mapa que utilice el usuario. En esta vista se muestra una ciudad en primer plano con colinas que se alzan en la distancia.

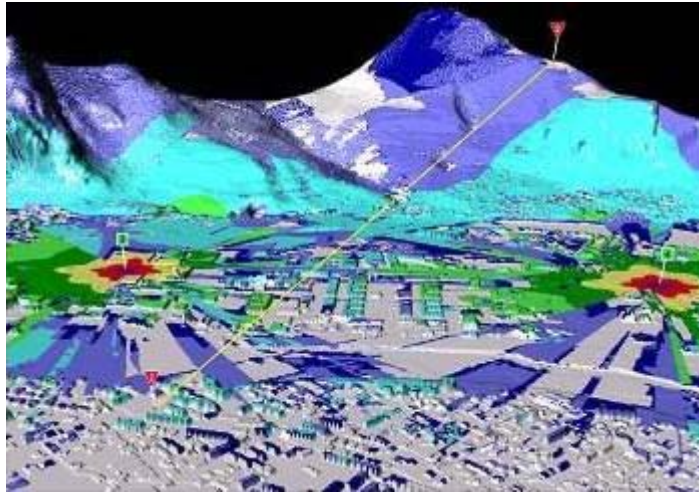


Ilustración 6.18. Cobertura tridimensional.

Análisis de interferencia potencial

Pocas redes de radio disfrutan en la actualidad de la libertad de que la cobertura tenga limitación de ruidos. La demanda de espectros supone tener que compartir frecuencias. ICS telecom permite al planificador analizar la interferencia resultante equilibrando la disponibilidad de la red con recurso y presupuesto del espectro. La ilustración 6.19 muestra un ejemplo de análisis de interferencia.

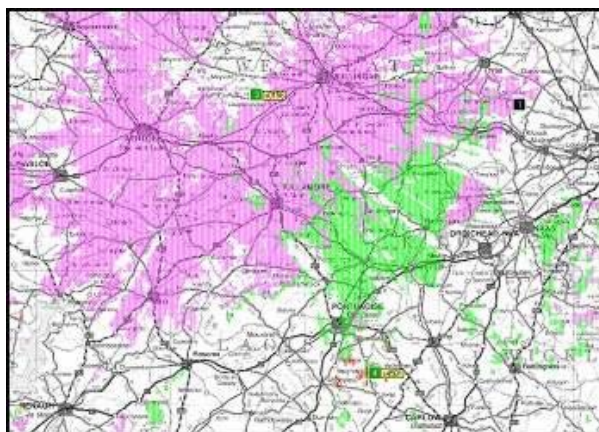


Ilustración 6.19. Visualización de un análisis de interferencia.

Repartición de retardos simulcast

El diseño de sistemas de radiodifusión simultánea tanto en radio móvil, como en servicios de paging y de radiodifusión ha sido durante mucho tiempo un campo de especialistas. Al pasar estas redes a la señalización de alta

velocidad debe tenerse en consideración la recepción de múltiples señales que han sufrido distintos retardos de propagación. Los colores que aparecen en la ilustración 6.20 muestran las zonas de peligro en las que los retardos de tiempo diferenciales superan los límites.

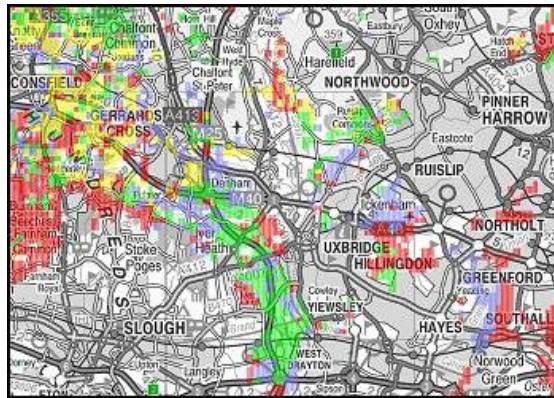


Ilustración 6.20. Ejemplo de repartición de retardos simulcast

Mejor servidor

En redes fijas de acceso por radio y, de hecho, en todas aquellas en las que se precisen enlaces hasta numerosas estaciones exteriores o suscriptores, conocer qué estación fija presta el mejor servicio tiene una importancia fundamental a la hora de orientar la antena del suscriptor. El informe puede incluir también el segundo, tercero, y así sucesivamente, el mejor servidor.

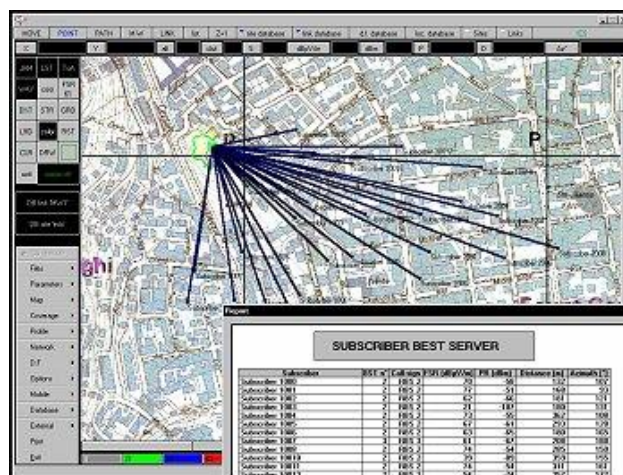


Ilustración 6.21. Ejemplo de mejor servidor.

Análisis completo de perfiles de enlace

El análisis completo de perfiles de enlaces es una función estándar integrada en ICS telecom que presenta de forma completa y detallada una muestra del terreno y de la geometría de cada perfil. Ofrece a los ingenieros encargados de la planificación de redes de radio la confianza de que un enlace comprendido entre dos usuarios podrá estar disponible cuando sea necesario.

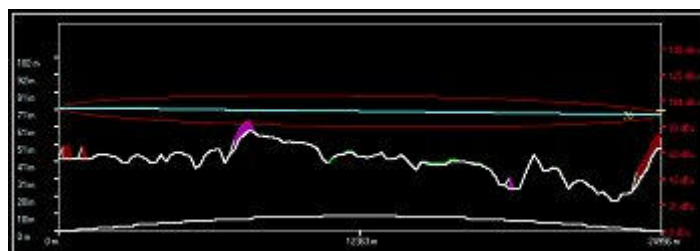


Ilustración 6.22. Análisis de perfiles.

Antenas direccionales de suscriptor

ICS telecom dispone como estándar de una base de datos interna de equipos. Esta herramienta permite al usuario diseñar sus propias antenas para su utilización en estaciones fijas, terminales de radioenlaces y en suscriptores. Dichas respuestas polares se pueden visualizar y utilizar en tres dimensiones, dando al encargado de la planificación de redes un potencial de modelado de redes prácticamente ilimitado. En la ilustración 6.23 se presenta un ejemplo.

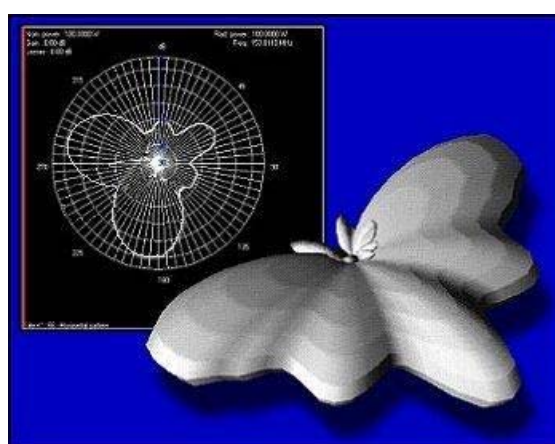


Ilustración 6.23. Ejemplo de un diseño de antena.

Base de datos de emplazamientos de alta capacidad Cada suscriptor ya viene incluido en otra potente base de datos que refleja la transición desarrollada desde la planificación general de área hasta la instalación de bases con perspectivas futuras conocidas, desarrollando de este modo las redes desde el concepto hasta su despliegue.

ID	Nombre	Frecuencia	Potencia	Estado
0001	Winton - Tingo Lora	2200.00	2200.00 MHz	000
0002	Winton - Tingo Lora	2200.00	2200.00 MHz	001
0003	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	006
0004	Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	000
0005	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	008
0006	Machi - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	001
0007	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	003
0008	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	004
0009	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	007
0010	Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	008
0011	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	000
0012	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	002
0013	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	005
0014	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	007
0015	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	008
0016	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	000
0017	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	003
0018	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	005
0019	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	007
0020	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	008
0021	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	000
0022	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	003
0023	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	005
0024	Quilman - Machi - Machi	2200.00	2200.00 MHz	007

Ilustración 6.24. Base de datos de emplazamientos de alta capacidad

Los datos se pueden a su vez importar desde una base de datos existente de departamentos de planificación de redes.

Base de datos multimedia por emplazamiento

Cada emplazamiento puede comprender cientos de equipos contiguos de estación fija/terminal. Cada estación fija/terminal tiene la capacidad de vincularse con Microsoft Word, Access, archivos de audio, archivos AVI, así como a varios formatos de archivo de imagen. Esta potente utilidad ofrece al encargado de planificación de redes la capacidad de registrar en su totalidad el historial, el estado actual y el futuro de cualquier emplazamiento de la red.

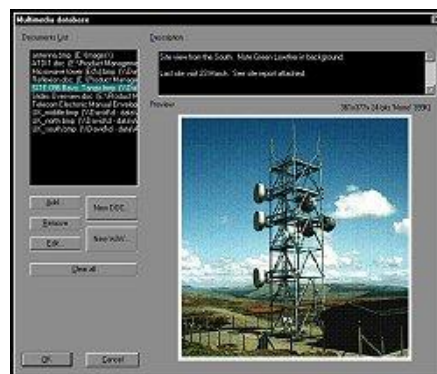


Ilustración 6.25. Base de datos multimedia por emplazamiento

6.4 ADAPTACION DEL MODELO DE PROPAGACION ANDINO-UIS A LA APLICACIÓN CELLVIEW®

6.4.1 Adición del mapa digital Bucaramanga_Metropolitana

Mediante el apoyo de la compañía TESAMERICA Andina Ltda⁵⁰, se logró adquirir por convenio académico un mapa digital completo de la zona metropolitana de Bucaramanga. Éste es un DCM que presenta la información en formato tipo Raster con resolución de 1 metro. El grid de datos del mapa contiene celdas con un valor único para la altura del terreno sumada a la altura de edificios.

Este mapa es adaptado con el nombre de Bucaramanga _ metropolitana dentro de la herramienta de planificación Cellview®.

En la ilustración 6.26, se puede apreciar el mapa digital adaptado a la herramienta.

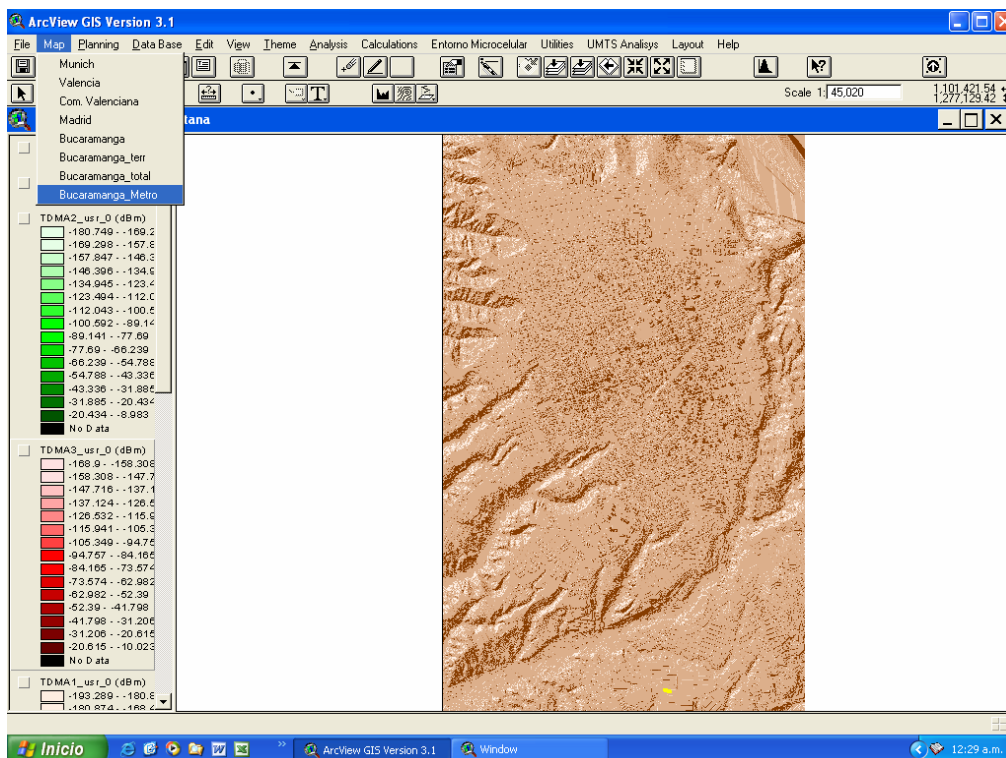


Ilustración 6.26. Mapa digital Bucaramanga_Metropolitana.

⁵⁰ <http://www.tesamerica.com>

En la investigación *Cobertura para sistemas móviles celulares en entorno urbano escarpado*⁵¹, fueron adaptados los mapas correspondientes a Bucaramanga, Bucaramanga_terr y Bucaramanga_total, a la herramienta de planificación Cellview®. Cada uno de estos mapas presenta la información sobre un sector de la ciudad de Bucaramanga, cada uno con una característica particular de sus datos. Bucaramanga presenta un grid de datos sobre altura de edificios, Bucaramanga_terr presenta un grid de datos sobre altura del terreno y Bucaramanga_total presenta tres grid's de datos sobre altura de edificios, altura de terreno y orientación de vías. A diferencia de estos mapas, el nuevo mapa además de ser completo, contiene un solo grid de datos (como ya se había mencionado) de la información de alturas de terreno más altura de edificios.

6.4.2 Habilitación modelo propuesto Andino-UIS dentro de la aplicación Cellview®

Inicialmente, la herramienta fue diseñada con la opción de aplicar los modelos Walfisch-Bertoni, Saunders-Bonnar Uniforme, Univalencia, UTD, Ok-Hata diseñados para un entorno netamente urbano sin consideración de la topografía terrestre. Los modelos rural Ok-Hata, Meeks Iluminación, Meeks Exacto, planteados para entornos netamente rurales considerando sólo la topografía.

En la investigación mencionada anteriormente, "*Cobertura para sistemas móviles celulares en entorno urbano escarpado*", fue adaptado el modelo COST231-Walfisch-Ikegami, para consideraciones de entorno urbano sobre topografía irregular en los análisis de cobertura.

En el presente trabajo, se logra enlazar el modelo Andino-UIS dentro de la aplicación Cellview®, para todo tipo de entornos, ya sea rural, metropolitano o

⁵¹ García Ariza Alexis Paolo, *Cobertura para sistemas móviles celulares en entorno urbano escarpado*, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Bucaramanga, Colombia, 2002.

Andino. La ilustración 6.27, muestra la opción que presenta la herramienta para aplicar el modelo planteado.

La adaptación del modelo a la herramienta de planificación se logra a través de la modificación y creación de varios Scripts contenidos en la aplicación Cellview®.

Las listas de los Scripts modificados y creados se presentan en la tabla 6.1. En el anexo A se muestra con detalle el código de los Scripts creados.

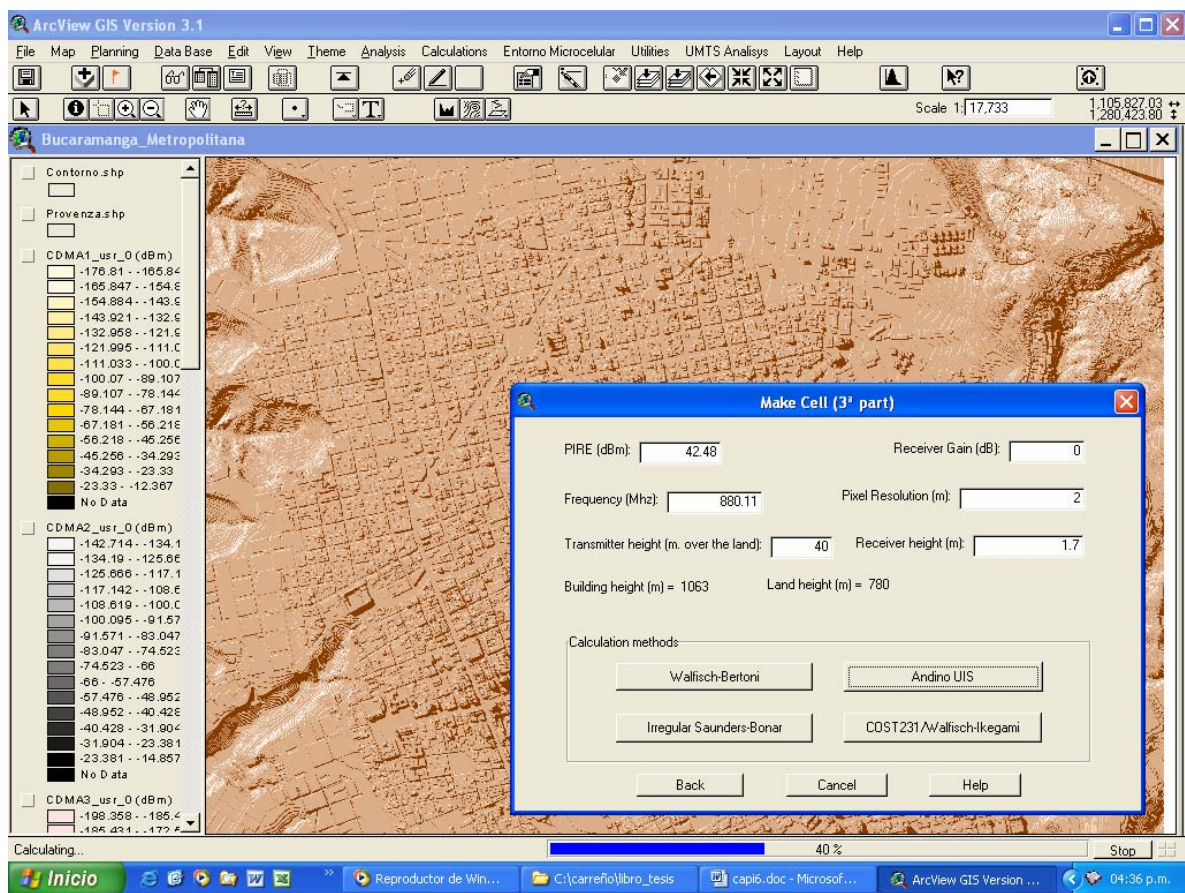


Ilustración 6.27. Aplicación del modelo Andino UIS.

También es creada una nueva sesión de trabajo llamada *andina* en la cual están cargados todos los mapas incluyendo el de Bucaramanga _ metropolitana. Ésta es una nueva sesión en donde se almacenan las simulaciones de las coberturas y los análisis de las mismas.

Scripts de Arcview
<i>Scrip1</i>
<i>cal_cob.ave</i>
<i>calc_cob_grid.ave</i>
<i>calcpot_a.ave</i>
<i>calcpot_b_metro.ave</i>
<i>dccell.dial_calc_cob1.lbt_cobtotal.ave</i>
<i>dccell.dial_calc_cob1.tol_txor.apply.ave</i>
<i>dccell.dial_calc_cob1.txl_y.apply.ave</i>
<i>dccell.Dial_calc_cob2_total.lbt_Aandinouis.Click</i>
<i>calcpot_c.ave</i>
<i>dccell.Dial_Calc_cob3.lbt_Siguiente.Click</i>
<i>dccell.Dial_calc_cob2_total.open.ave</i>
<i>dccell.cambiar_a_plano_de_bucaramanga.ave</i>
<i>dccell.cambiar_a_plano_de_bucaramanga_Metropolitana.ave</i>
<i>dccell.cambiar_a_plano_de_bucaramanga_terr.ave</i>
<i>dccell.cambiar_a_plano_de_bucaramanga_total.ave</i>
<i>dccell.cambiar_a_plano_de_comunidad_valenciana.ave</i>
<i>dccell.cambiar_a_plano_de_madrid.ave</i>
<i>dccell.cambiar_a_plano_de_valencia.ave</i>
<i>dccell.cambiar_a_plano_de_valencia+terreno.ave</i>
<i>dccell.cambiar_a_plano_de_munich.ave</i>
<i>dccell.cambiar_a_plano_de.valcen.ave</i>
<i>dccell.dial_tems.adapta.fin.aceptar.click.ave</i>
<i>dccell.sesion_elegirtipo.okboton.click.ave</i>
<i>dccell.sesion.cargarmapas.close.ave</i>
<i>dccell.dial_tems.adapta.prog1.ave</i>
<i>dccell.dial_tems.ver.aceptar.ave</i>

Tabla 6.1 Scripts de Arcview[®] creados y modificados.

6.4.3 Georeferenciación de los archivos de datos.

Algunos productos de datos (GIS, Digital Mapping y software de Sensor Remoto) proporcionan archivos de datos que son georeferenciados. Si los gráficos en el archivo de datos han sido posicionados utilizando un sistema de coordenadas, la información aparecerá en la posición geográfica correcta.

Otros archivos de datos, mayormente los creados en CAD, o imágenes escaneadas, no consideran su ubicación en el mundo o simplemente poseen una georeferenciación particular, es el caso del archivo Bucara.shp que posee la información sobre el contorno de la zona metropolitana de Bucaramanga (Ver ilustración 6.28). Para poder georeferenciar correctamente el archivo

Bucara.shp y los mapas utilizados en este trabajo, fue necesario utilizar la extensión *Projector* del GIS Arcview®, para ello se debe primero cargar el archivo *prjctr.avx* del archivo *ESRI\lav_gis30\ARCVIEW\Samples\EXT* al archivo *ESRI\lav_gis30\ARCVIEW\EXT32*.

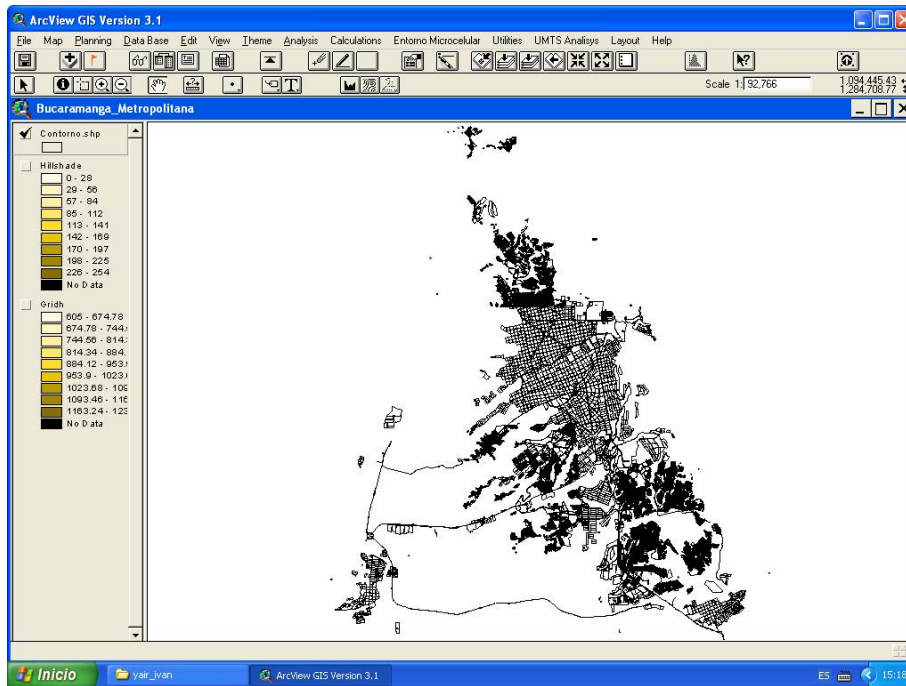


Ilustración 6.28 Contorno de la ciudad Bucaramanga (contorno.shp).

Los parámetros básicos que se deben tener en cuenta al momento de realizar la re-georeferenciación son:

Proyección, Datum, zona, unidades de mapa, Esferoide, Factor escala del meridiano central, longitud del meridiano central, latitud origen, falso Este, Falso Norte. En la sección 6.1.3 se ha presentado una descripción de estos parámetros.

En las tablas 2, 3 y 4 se presenta la información cartográfica del Datum Bogotá, la georeferenciación de Bucaramanga y la georeferenciación utilizada para convertir coordenadas rurales planas de Bucaramanga a coordenadas rurales planas de Bogotá.

Parámetros coordenadas planas rurales Bogotá	
projection	transverse
Datum	Bogotá
Zunits	18
units	meters
Spheroid	INTERNATIONAL1909
Xshift	0.0000000000
Yshift	0.0000000000
scale factor at central meridian	1,0000000
longitude of central meridian	-74.0809166
latitude of origin	4.599047222
false easting (meters)	1000000
false northing (meters)	1000000

Tabla 6.2 Parámetros coordenadas planas rurales Bogotá

Parámetros coordenadas planas rurales Bucaramanga	
projection	transverse
Datum	BOO
Zunits	18
units	meters
Spheroid	INTERNATIONAL1909
Xshift	0.0000000000
Yshift	0.0000000000
scale factor at central meridian	1,0000000
longitude of central meridian	-73.2007941
latitude of origin	7.0816275
false easting (meters)	97236.74000
false northing (meters)	74643.50000

Tabla 6.3 Parámetros coordenadas planas rurales Bucaramanga

Parámetros coordenadas planas para re-georeferenciar el mapa Bucara.shp	
projection	transverse
Datum	Bogotá
Zunits	18
units	meters
Spheroid	INTERNATIONAL1909
Xshift	0.0000000000
Yshift	0.0000000000
scale factor at central meridian	1,0000000
longitude of central meridian	-81.358
latitude of origin	-3.378
false easting (meters)	192663.789
false northing (meters)	110156.513

Tabla 6.4 Parámetros coordenadas planas para re-georeferenciar el mapa Bucara

En la Ilustración 6.29 y 6.30 se observan los mapas de contorno y alturas, igualmente georreferenciados.

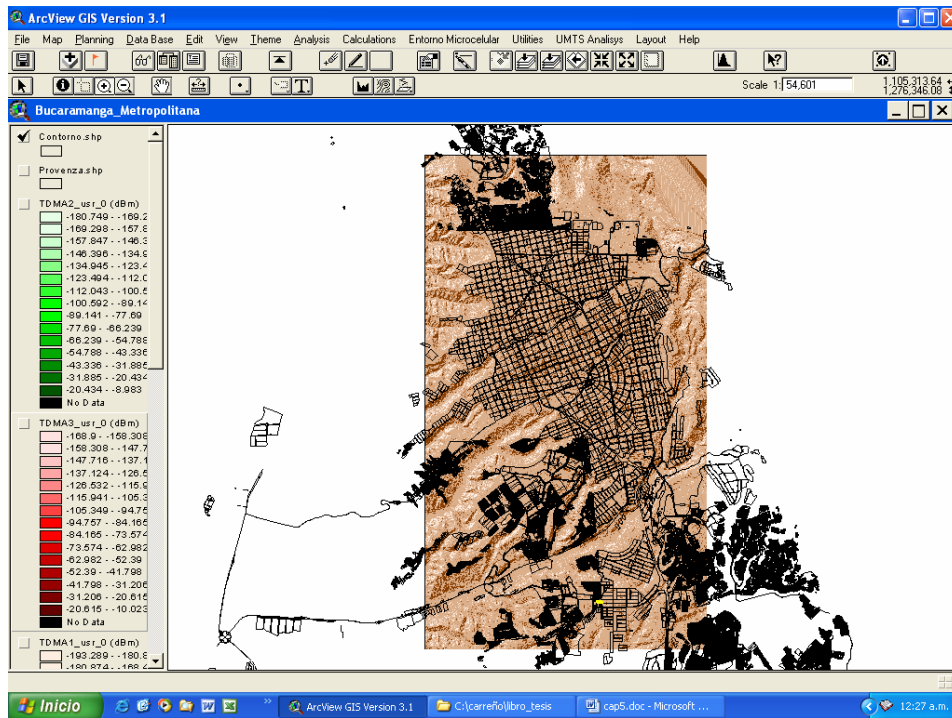


Ilustración 6.29. Contorno de la ciudad Bucaramanga y grid de alturas (contorno.shp y Gridh).

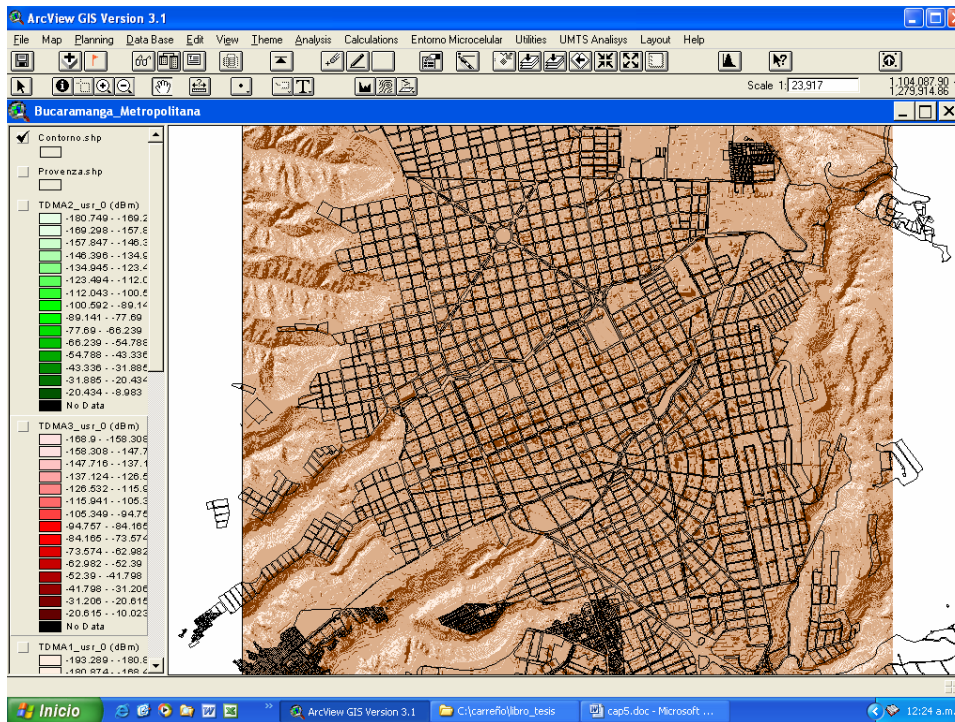


Ilustración 6.30. Contorno de la ciudad Bucaramanga e Hillshade.

6.4.4 Adaptación de las nuevas antenas sectorizadas.

El patrón de radiación es uno de los principales parámetros de entrada que considera el modelo de propagación Andino-UIS, por ello es importante referenciar la antena de la base estación utilizada para la simulación de las coberturas.

Inicialmente la herramienta de planificación Cellview[®] venía implementada con una serie de antenas elementales: Antena isotrópica, Dipolo elemental, Dipolo medio. Posteriormente, para llevar a cabo el desarrollo de la investigación ya mencionada “Cobertura para sistemas móviles celulares en entorno urbano escarpado”, fue necesario adaptar la antena tipo omni de referencia ASPD977. En la ilustración 6.31 se muestra su patrón de radiación.

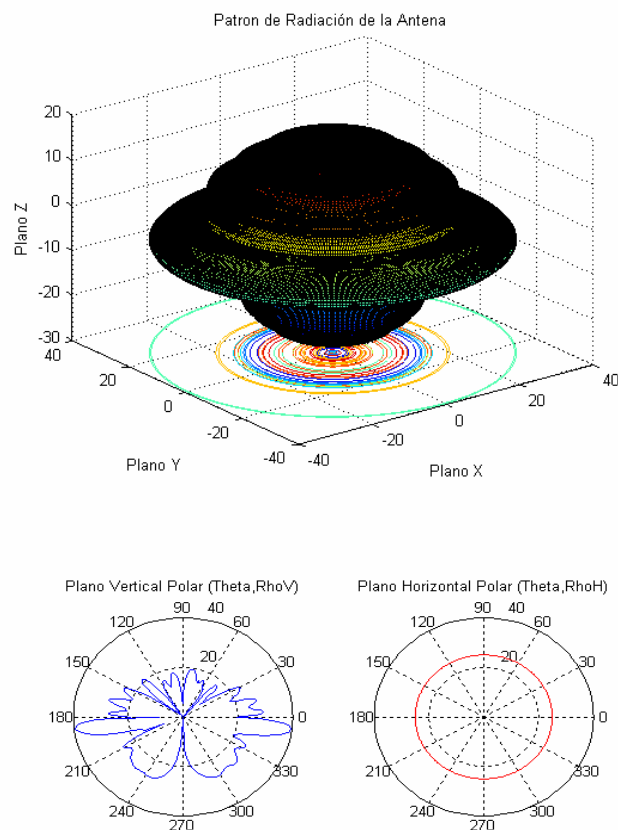


Ilustración 6.31 Patrón de radiación de la antena ASPD977

En la actualidad, la misma estación base ha adoptado antenas de sectorización direccional de grado 3 (separación entre cada antena de 120°),

de referencia 855DDH90E, bajo la tecnología TDMA (estándar IS-136) ubicada en la parte superior de la estación base, y antenas bajo la tecnología CDMA de referencia D8874G90R, ubicadas en la parte inferior de la estación base, igualmente, con sectorización direccional de grado 3. Existe una diferencia de 60° entre cada panel TDMA y CDMA. El patrón de radiación de las antenas TDMA y CDMA se muestra en la ilustración 6.32 y 6.33 respectivamente, y sus parámetros en las tablas 6.2 y 6.3.

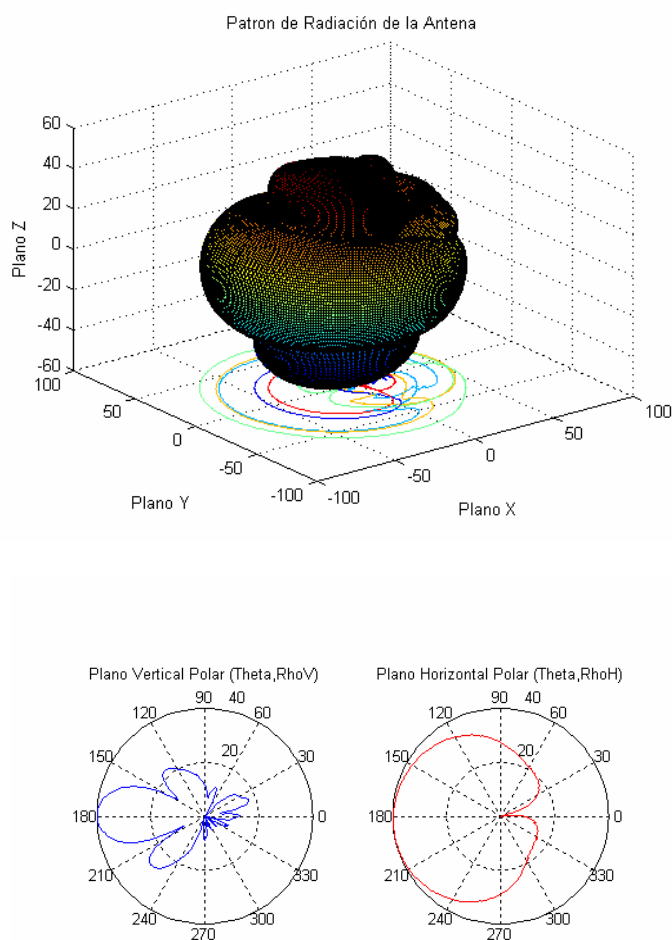


Ilustración 6.32 Patrón de Radiación de la antena 855DDH90E

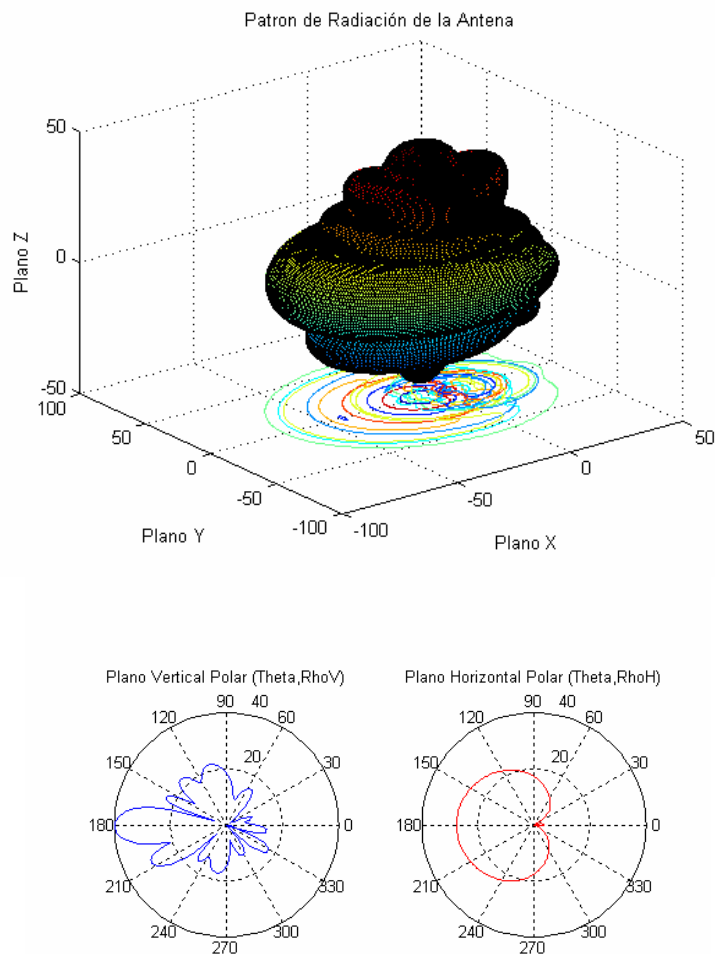


Ilustración 6.33 Patrón de radiación de la antena D8874G90R

Estas antenas fueron adaptadas para el desarrollo de las investigaciones ya mencionadas: Radiopropagación en las comunicaciones móviles con tecnología CDMA en presencia de terreno escarpado y Análisis de irradiación electromagnética en las inmediaciones de una radio base sectorizada bajo condiciones andinas, a las cuales se puede hacer referencia para mayor información⁵².

La adaptación de éstas y cualquier tipo de antena dentro de la herramienta Cellview, consiste básicamente en crear un archivo .dat con los datos del

⁵² Cristian García López, José Luis Meléndez *Radiopropagación en las comunicaciones móviles con tecnología CDMA en presencia de terreno escarpado*. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Bucaramanga, Colombia, 2004.

patrón de radiación de la antena y su posterior almacenamiento en el directorio *ESRI\diagramas*. Además de modificar algunos Scripts para habilitar el tipo de antena.

PARAMETROS	VALOR
Sistema TDMA/IS-136	
PIRE del transmisor	42.48dBm
Ganancia del receptor	0dB
Ganancia antena 855DDH90E	12.1dBi
Frecuencia CCA	880.11MHz
Altura del Transmisor	40m
Altura del Receptor	1.7m
Downtilt de la antena	3°
Azimut de las antenas	40, 160 y 280°
Factor de curvatura K	1.33
Tamaño de celdas del grid para simulación	3m

Tabla 6.5 Parámetros del transmisor con las antenas 855DDH90E. D8874G90R

PARÁMETROS	VALOR
Sistema CDMA	
PIRE de la Base	40 dBm
Ganancia de la antena DB874G90R	12,5 dBd
Ganancia del receptor	0dB
Portadora	881,525MHz
Altura del transmisor	38mt
Altura del receptor	2,5mt
Azimut de la antena	100°, 220° y 340°
Downtilt de la antena	0°
Factor de curvatura K	1,33
Tamaño de celdas del grid	3mt

Tabla 6.6 Parámetros del con las antenas

En la presente investigación, los cálculos de cobertura que serán presentados en el siguiente capítulo, fueron realizados considerando las antenas de referencia 855DDH90E.

6.5 DISEÑO DEL ALGORITMO

Para la ejecución del modelo planteado y de acuerdo a las exigencias del mismo, fue necesario realizar algunos procedimientos para la realización de los cálculos de pérdidas, los principales fueron: identificación del perfil de obstáculos, cálculo de la altura promedio de los obstáculos, cálculo de la separación promedio entre obstáculos e identificación de las zonas del mapa

correspondientes a una vía o a una convergencia de vías y determinación de su respectiva orientación.

6.5.1 Identificación de vías y convergencia de vías

Como se mencionó en la sección 6.4.1, se cuenta con un mapa digital completo de la zona metropolitana de Bucaramanga cuya información se presenta con resolución de un metro. Al momento de realizar la simulación de una cobertura, el Cellview proporciona una matriz de datos que contiene valores sobre la altura de edificios más la altura del terreno.

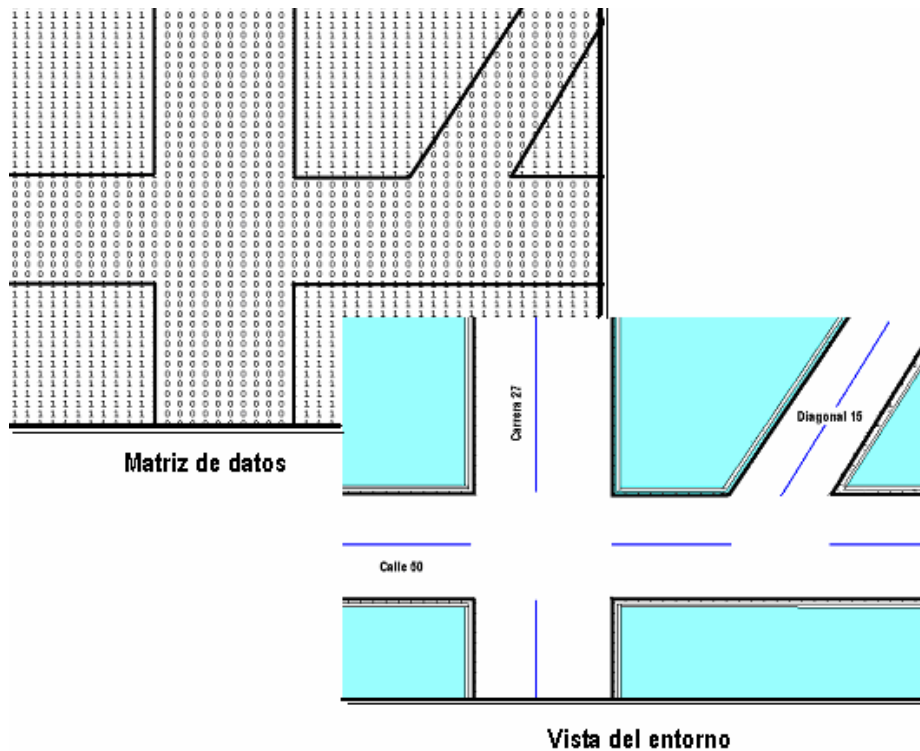


Ilustración 6.34 Datos del Cellview®.

El problema consistió en identificar a partir de dicha matriz, el entorno de la ubicación del receptor, es decir, conocer si el receptor se encontraba sobre un edificio o sobre una calle. Si el punto de ubicación correspondía a una calle, se identifica si pertenece a una vía o una convergencia de vías y se determina sus correspondientes orientaciones.

El único factor con el que se cuenta para caracterizar el entorno alrededor de una posición es la diferencia abrupta de alturas. Esto significa que al cambiar de un punto sobre una calle a un punto sobre un edificio; se notará una

diferencia de altura considerable entre ellos. Con base a esta característica y utilizando una filosofía de dos estados (lógica digital), se realiza un barrido (sondeo) alrededor de la posición analizada con el fin de determinar si existen dichas diferencias de alturas y de acuerdo a la ocurrencia con la que se registren se establece si la posición analizada se puede clasificar como una convergencia de vías, una simple vía, un espacio abierto o simplemente un punto correspondiente a un edificio.

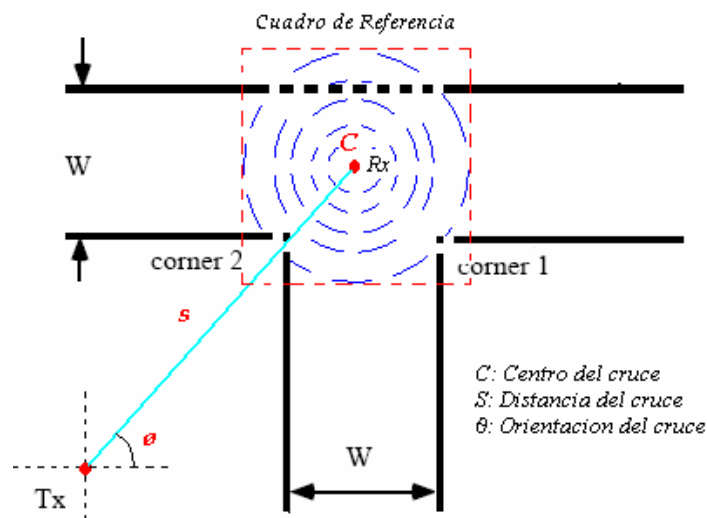


Ilustración 6.35 Sondeo alrededor de un punto

Para realizar un barrido apropiado se crea un elemento de apoyo llamado cuadro de referencia. Las dimensiones del cuadro de referencia son establecidas de acuerdo a las dimensiones promedio de las vías en un entorno urbano real (esto no implica que el método general sea estadístico). De este parámetro depende en gran parte la efectividad del análisis ya que se debe asegurar que sus dimensiones no sean tan grandes como para clasificar toda zona de análisis como una convergencia o tan pequeñas como para registrar sólo espacios libres, esto se explica gráficamente en la Ilustración 4 en donde se observa que:

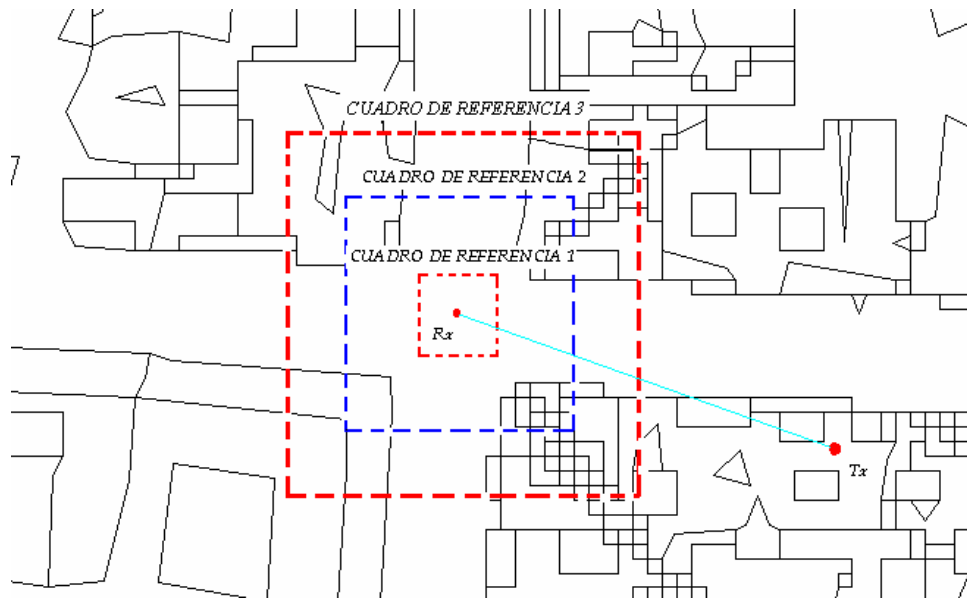


Ilustración 6.36 Dimensiones del marco de referencia

El cuadro de referencia 1 al tener dimensiones pequeñas no alcanza a cubrir el área necesaria para tomar un criterio, por el contrario el cuadro de referencia 3 al ser demasiado amplio puede incurrir en errores al considerar sectores de espacios abiertos como convergencias de vías; en este caso un posible cuadro de referencia adecuado sería el cuadro de referencia 2.

Al momento de realizar la simulación, se presenta la opción de seleccionar el tamaño de la celda, el cual se recomienda que sea de 2 a 4 metros, si se selecciona por ejemplo, 2 metros, significa que cada celda representa un área de 4 metros cuadrados. El tamaño de la celda influye en el tiempo de ejecución del algoritmo programado, Bajo el supuesto de que una convergencia está dentro de las dimensiones de 7 metros hasta 20 metros, es capaz de identificar un cruce con dimensiones de hasta 22 metros. (mayor a esta dimensiones, se considera espacio abierto). Finalmente, una vez identificada la vía o la convergencia, se determina su respectiva orientación.

Para verificar la efectividad del algoritmo en la identificación de las vías y convergencias de vías sobre el mapa digital, se realizó la siguiente simulación de prueba, obteniéndose resultados como el que presenta la ilustración 6.37. Se observa que son identificadas tanto las convergencia de vías como todo entorno con características de canal semejante a una vía.



Ilustración 6.37 Identificación de vías y convergencias

6.5.2 Determinación del perfil.

Del mapa digital es extraído un perfil que contiene los obstáculos ubicados entre el transmisor y el receptor. Dicho perfil es formado por las alturas de los obstáculos, las cuales se hallan referenciadas con respecto a la altura de la posición del receptor. Por lo tanto, estará conformado por valores de alturas positivas y alturas negativas, sin embargo, para el modelo sólo representan obstáculos aquellos cuya altura esté por encima de la altura del receptor. Debido a las condiciones del modelo, el perfil es idealizado a un conjunto de obstáculos con una altura promedio semejante y espaciados entre sí a una distancia promedio. Las ilustraciones 6.38, 6.39 y 6.40, representan el proceso.

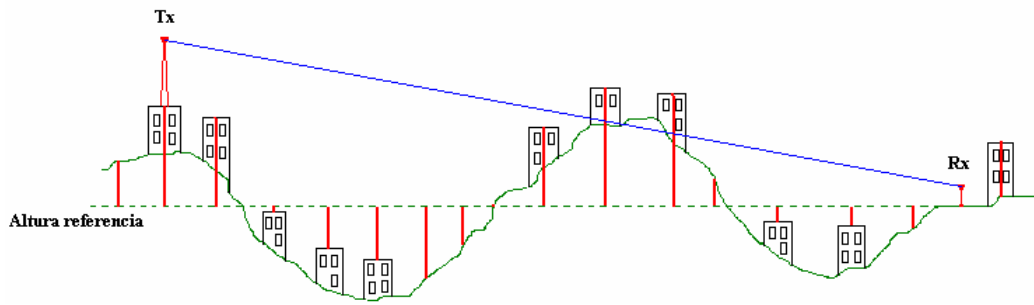


Ilustración 6.38 Perfil de obstáculos.

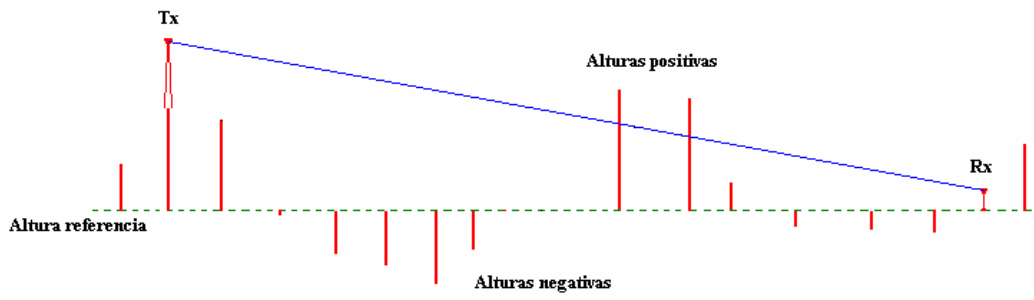


Ilustración 6.39 Perfil de alturas de los obstáculos.

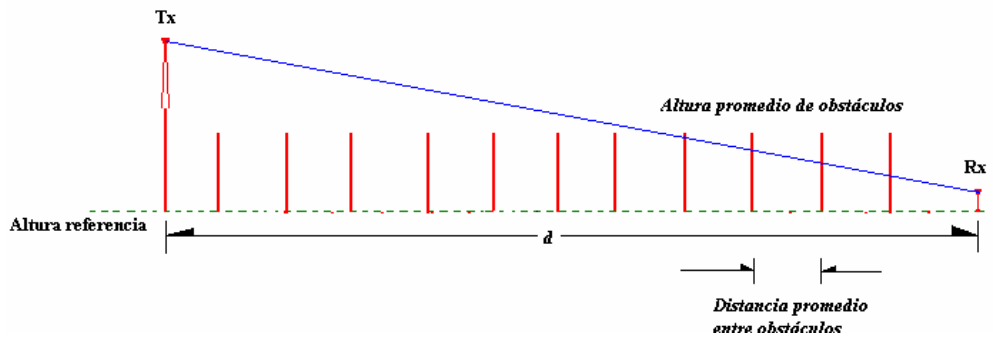


Ilustración 6.40 Perfil de alturas de los obstáculos.

CAPITULO 7

VALIDACIÓN DEL MODELO ANDINO UIS® MEDIANTE CAMPAÑAS DE MEDIDAS

Una vez adaptado el modelo propuesto a una herramienta de planificación, se procede a realizar simulaciones de coberturas tanto en los sistemas TDMA/IS-136 como CDMA para luego ser comparadas con los resultados obtenidos en las campañas de mediciones de intensidad de campo en las zonas seleccionadas de la ciudad de Bucaramanga.

De acuerdo a los objetivos planteados, fueron realizadas mediciones en cruces de vías, sin embargo a través de investigaciones anteriores se ha logrado recopilar información sobre campañas de medidas hechas en sectores de los barrios San Luís, Bucaramanga, Provenza y La Victoria. Para el desarrollo de la presente investigación se ha utilizado parte de esa información, seleccionando aquellos sectores que presentan un entorno topográfico variado (colina, planicie, cañón).

En éste capítulo se presenta los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en puntos específicos de convergencias de vías, las mediciones seleccionadas de investigaciones anteriores y el posterior análisis comparativo con los resultados de las simulaciones.

7.1 EQUIPO DE MEDICION

Para realizar las campañas de medida fue necesario tener en cuenta tres elementos: La estación base (el transmisor), el analizador de RF (el receptor) y el software de adquisición de datos (la interfaz).

7.1.1 La Estación Base (BS): Los datos muestrales utilizados en la presente investigación, fueron obtenidos en sectores pertenecientes a la celda de la radio base ubicada en la Calle 105 con Carrera 21 del barrio Provenza de Bucaramanga. Las características de dicha base estación fueron mencionadas

en el capítulo anterior. En la ilustración 7.1 se muestra un perfil de la radio base en mención.



Ilustración 7.1 Radio base Provenza

7.1.2 El analizador de RF (MS): Como elemento receptor fue utilizado el equipo de medición *Miniport Receiver EB200* de la compañía Rohde&Schwarz⁵³, facilitado por el Ministerio de Comunicaciones de Colombia Seccional Bucaramanga. Sobre éste equipo existe extensa información en las

investigaciones (referenciadas en el capítulo anterior) llevadas a cabo por el grupo de investigación RadioGIS y en las cuales se ha trabajado con el mismo equipo.

Hay que destacar el hecho de que éste equipo de medición proporciona las mediciones en unidades de $dB\mu V/m$ y $dB\mu V$. Por lo tanto es necesario hacer una conversión de unidades a dBm mediante la ecuación:

$$P_{R[dBm]} = E_{[dB\mu V/m]} - 129,76 + 20\log(\lambda) \quad (7.1)$$

⁵³ Rohde&Schwarz. Miniport receiver EB200 - portable monitoring from 10kHz to 3GHz [online]. [Munich, Germany] : Rohde&Schwarz, 2002. Available from Internet: <URL:<http://www.rohde-schwarz.com>>.

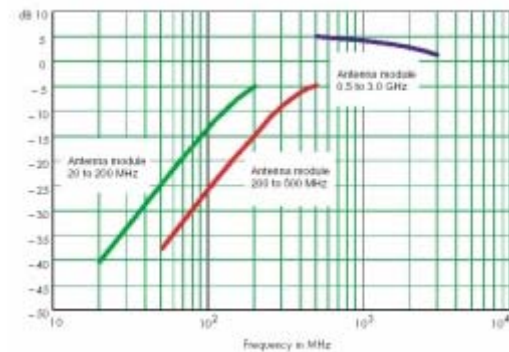
En la ilustración 7.2 se aprecia el aspecto externo del equipo, antena para un rango de 0.5-3GHz, panel frontal de control y las curvas de ganancia de las antenas.



a)



b)



c)

Ilustración 7.2 Equipo de monitoreo Miniport Receiver EB200. a) Cuerpo del equipo y antena de operación para el rango de 0.5-3GHz. b) Panel frontal de control y c) curvas de ganancia.

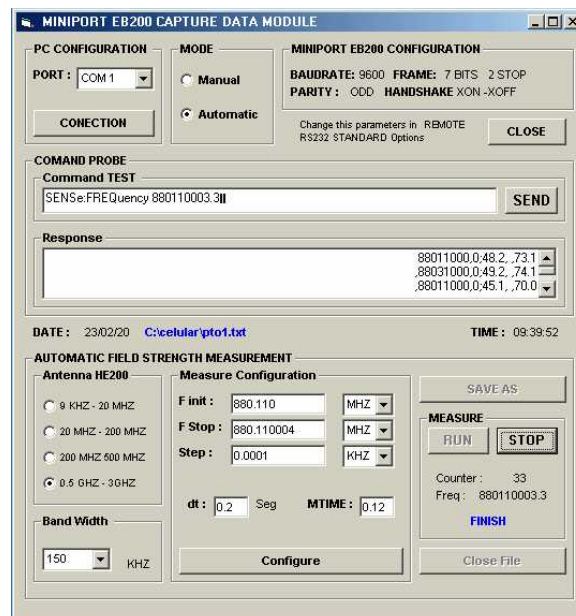
7.1.3 El software de adquisición: Corresponde a una software creado por el grupo de investigación Maxwell de la Universidad de Investigación y Desarrollo (UDI)⁵⁴. Permite realizar el control de los datos adquiridos por el Miniport Receiver EB200. Éste software permite generar y almacenar un archivo de datos con la información de las mediciones por punto, esto facilita la toma de datos logrando así que el procedimiento de mediciones de campo sea más

⁵⁴ Ing. José Rugeles, Ing. Antonio Jaimes, Mildred Rodríguez y Diana Serrano Grupo de Investigación Maxwell. Universidad de Investigación y Desarrollo. Bucaramanga 2004.

rápido y automático. Actualmente es utilizado por el Ministerio de Comunicaciones en la realización del monitoreo de espectro.



a)



b)

Ilustración 7.3 Software para el manejo de datos del equipo de monitoreo Miniport Receiver EB200. a) Presentación y b) visualización de la interfaz del usuario.

7.2 SELECCIÓN DE LAS ZONAS PARA LA TOMA DE MEDIDAS

Al momento de seleccionar las zonas en donde serian llevadas a cabo las mediciones se tuvieron en cuenta las características del entorno, por ejemplo se eligieron sectores ubicados sobre distintos tipos de topografía y zonas correspondientes a cruces de vías.

A continuación se describe los sectores en donde se llevaron a cabo las mediciones y las rutas de medición utilizadas tanto para el sistema TDMA⁵⁵ como para el sistema CDMA⁵⁶.

7.2.1 Barrio Bucaramanga

Éste barrio se caracteriza por estar ubicado sobre una colina. Las mediciones para el sistema TDMA fueron llevadas a cabo a largo de tres rutas, una en la cima de la colina, otra en una pendiente de la falda y la última en la parte más baja del barrio donde termina la pendiente. Para el sistema CDMA se utilizó una ruta caracterizada por su leve inclinación y la presencia de una pequeña montaña en gran parte de su trayecto.



Ilustración 7.4 Mediciones barrio Bucaramanga

7.2.2 Barrio Provenza

Es una zona urbana sobre terreno plano, cercana a la ubicación de la radio base. Las mediciones para el sistema TDMA se llevaron a cabo sobre tres rutas, una próxima a la BS y otras dos sobre una zona relativamente plana. Para el sistema CDMA se eligió una ruta próxima a la estación base con

⁵⁵ García Ariza Alexis Paolo, Cobertura para sistemas móviles celulares en entorno urbano escarpado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Bucaramanga, Colombia, 2002.

⁵⁶ Cristian García López, José Luis Meléndez *Radiopropagación en las comunicaciones móviles con tecnología CDMA en presencia de terreno escarpado*. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Bucaramanga, Colombia, 2004.

condiciones topográficas uniformes (terreno plano) y otra ruta con trayecto cóncavo en su superficie sin Línea de Vista (NLOS).

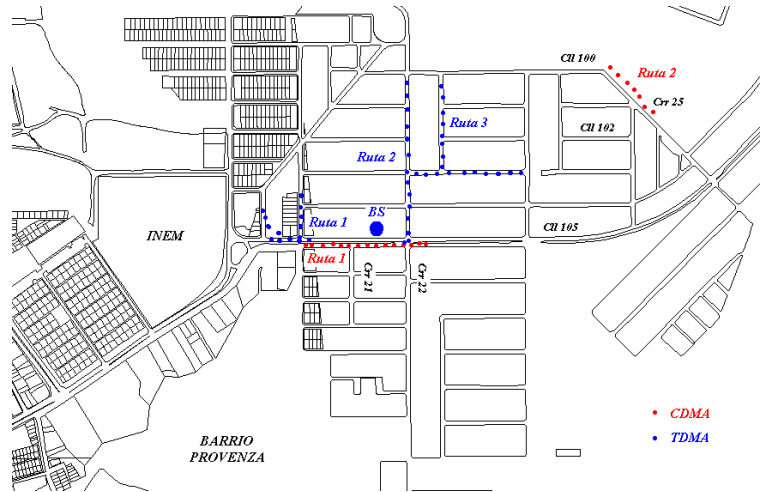


Ilustración 7.5 Mediciones barrio Provenza

7.2.3 Barrio San Luís

Se caracteriza por ser una zona urbana inclinada. Para el sistema TDMA se utilizaron dos rutas ubicadas sobre una vía. Para el sistema CDMA se utilizó una ruta destacada por su pronunciada pendiente y su condición parcial de NLOS y una ruta ubicada sobre terreno plano sobre el cañón.

Para obtener mayor información sobre las rutas a las cuales se ha hecho referencia, se puede consultar las investigaciones mencionadas. Sin embargo, en el anexo B se presenta la información de las campañas de medidas que fueron utilizadas para el presente trabajo.

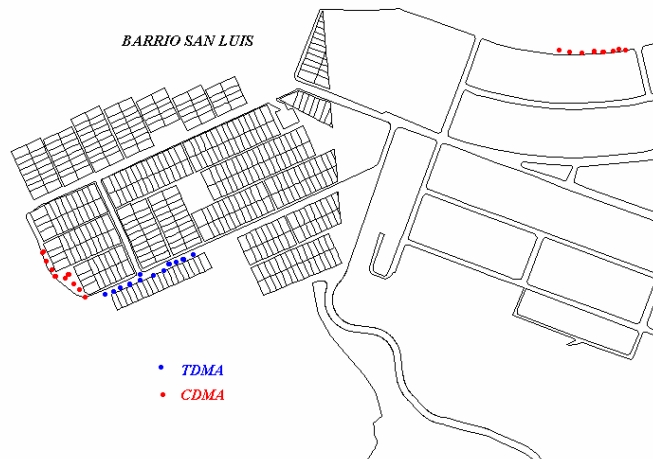


Ilustración 7.6 Mediciones barrio San Luis

7.3 MEDICIONES EN CONVERGENCIAS DE VÍAS

Para determinar el nivel de predicción dado por el modelo Andino UIS en zonas pertenecientes a convergencias de vías (como por ejemplo la mostrada en la ilustración 7.7), se llevaron a cabo mediciones de campo en las zonas de la ciudad descritas a continuación.



Ilustración 7.7 Ejemplo de convergencia de vías en un entorno semi-urbano.
Calle 106A Crr 21 B. Provenza.

Al inicio de la investigación se pensó en realizar un protocolo de medición como el que propone Anderson⁵⁷. En éste, se parametriza los alrededores de una esquina para realizar mediciones en puntos específicos. Sin embargo de acuerdo al análisis establecido en la sección 5.2.1 se optó por llevar un procedimiento común que consistía básicamente en registrar valores de intensidad de campo en distintos puntos cualesquiera dentro de la convergencia. Este procedimiento también es justificado por el COST 259⁵⁸.

7.3.1 Mediciones en convergencias de vías del barrio Provenza

Se midió intensidad de campo en los 16 puntos mostrados en la ilustración 7.8, sin embargo, en algunos puntos se hicieron mediciones adyacentes generando un total de 20 puntos de medición, cada uno con un promedio de 40 mediciones registradas.

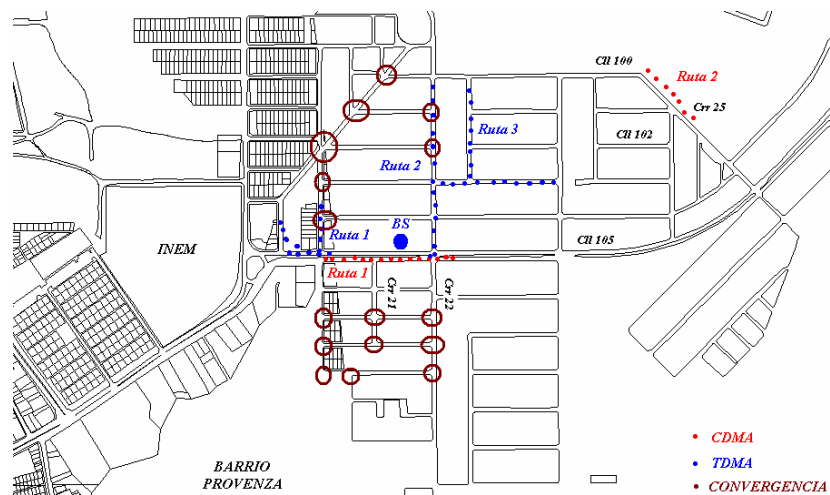


Ilustración 7.8 Convergencias barrio Provenza

⁵⁷ Anderson Harry R., *Building Corner Diffraction Measurements and Predictions Using UTD*, IEEE Trans. On Antennas and Propagation, Vol. 46, N° 2, February 1998.

⁵⁸ *Lamppost and Panel Scattering Compared to Building Reflection and Diffraction*, COST 259 Paper May 1997.

7.3.2 Mediciones en convergencias de vías del barrio Diamante II

En éste barrio fueron registrados 7 puntos de medición con un promedio de 40 mediciones por punto.

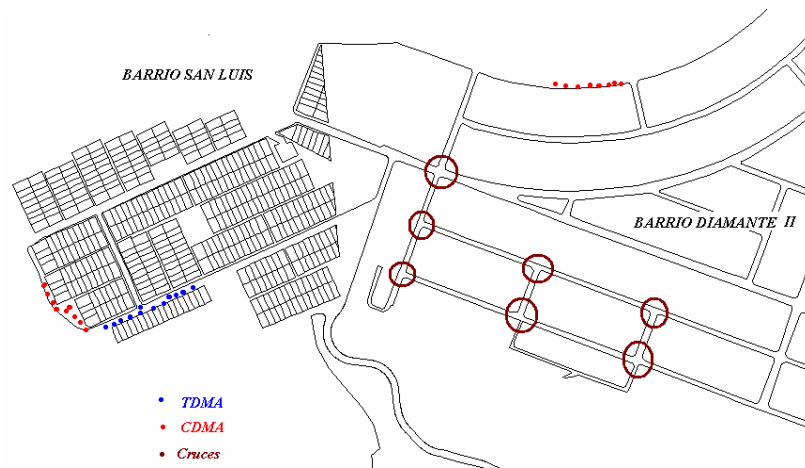


Ilustración 7.9 Convergencias barrio Diamante II.

El nivel de señal en cada punto de medición fue promediado y los resultados se encuentran registrados en el anexo B. Sin embargo, la información completa de todas las mediciones por punto son presentados en el anexo E.

En total fueron utilizados un promedio de 300 puntos de medición que incluyen medidas para el sistema TDMA, CDMA y convergencias de vías. Éste número de mediciones es suficiente para validar el modelo propuesto, si se considera el total de mediciones registradas en el desarrollo de otros modelos⁵⁹.

7.4 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Una vez realizadas las campañas de medidas y teniendo una serie de datos muestrales de la intensidad de campo en diferentes sectores de la ciudad, se procedió a realizar las simulaciones mediante la herramienta de planificación.

Los parámetros del transmisor y receptor utilizados para la simulación fueron mencionados en el capítulo anterior y presentados en las tablas 6.5, 6.6. En el anexo B se presenta los resultados de las simulaciones hechas tanto para el sistema TDMA como para el sistema CDMA.

⁵⁹ Smulders, M. Jevrosimovic, M. Revén, S. Savov and E. Martijn of (TU/e). *State of the art channel models*.

Las ilustraciones 7.10 y 7.11 visualizan el resultado de las simulaciones realizadas con la herramienta de planificación para los sistemas TDMA y CDMA respectivamente. Cada color representa un sector de cobertura dado por la antena sectorizada.

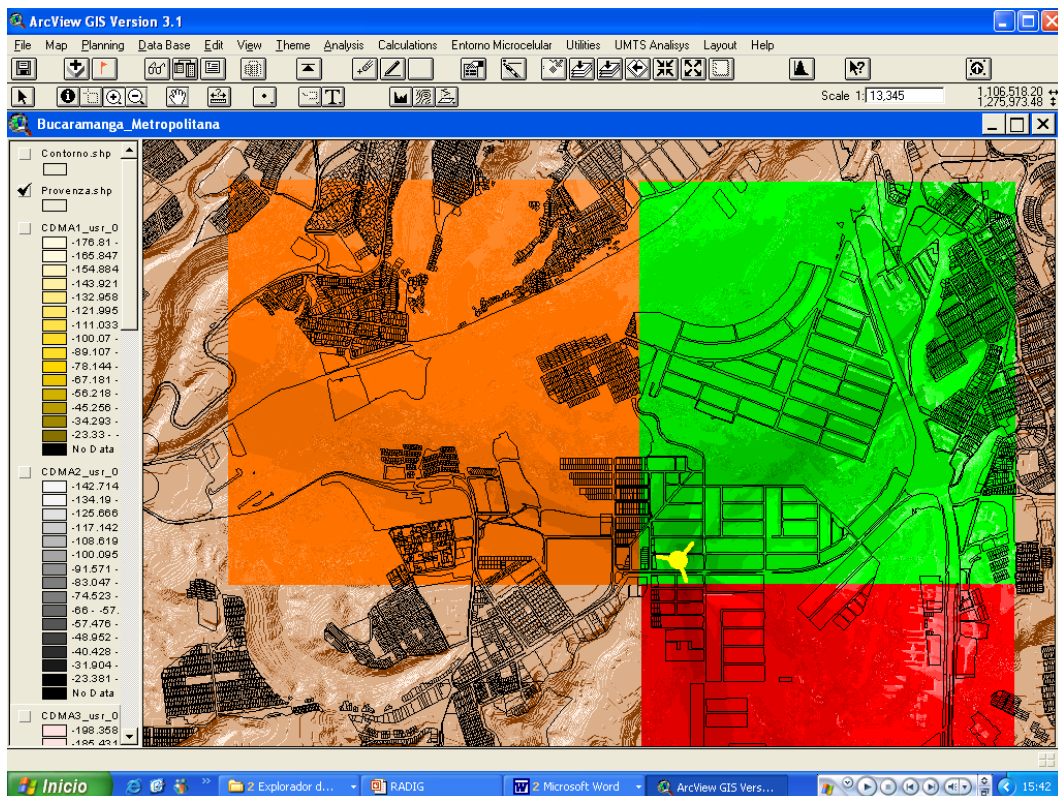


Ilustración 7.10 Simulación de cobertura para el sistema TDMA/IS-136.

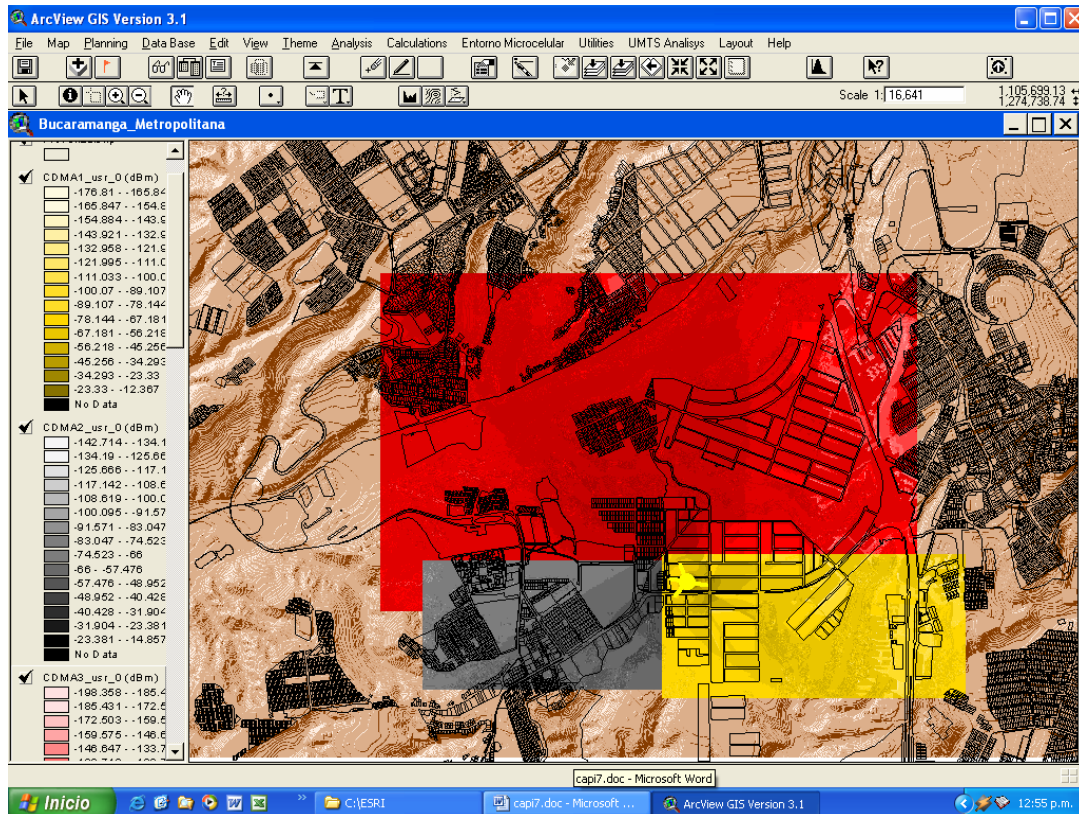


Ilustración 7.11 Simulación de cobertura para el sistema CDMA.

7.5 ANALISIS DE RESULTADOS.

Los resultados arrojados por las simulaciones fueron comparados con los datos muestrales obtenidos de las campañas de medidas.

En las ilustraciones 7.12 y 7.13 se comparan los resultados de las mediciones por punto registradas con el equipo de medición y los resultados de las simulaciones. Aquí son incluidos todos los puntos examinados, es decir, puntos ubicados sobre vías o convergencia de vías.

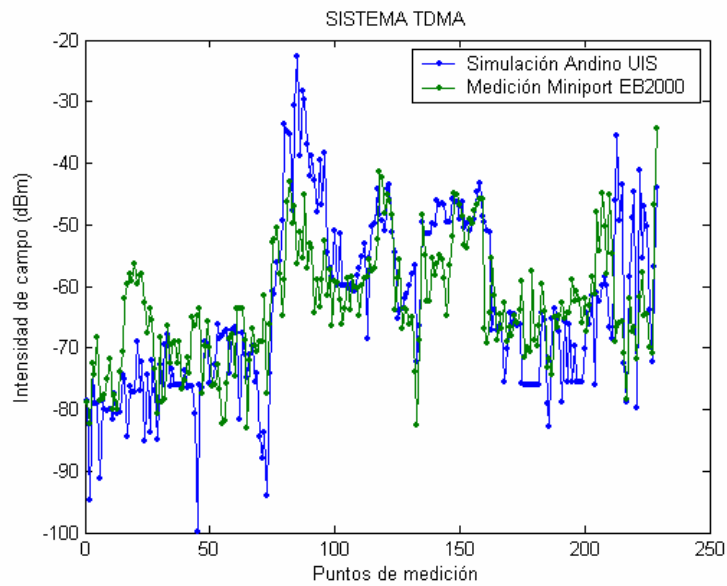


Ilustración 7.12 Puntos de medición para el sistema TDMA.

De la ilustración 7.12 se puede apreciar que para el sistema TDMA se presenta en la mayoría de los puntos una diferencia baja entre lo simulado y lo medido. Lo mismo ocurre para los puntos analizados del sistema CDMA representados en la ilustración 7.13, en donde se observa un nivel de predicción eficiente en la mayoría de los sectores.

Esto significa que se logra cierto grado efectividad en la predicción, al menos en el 90% de los datos muestrales.

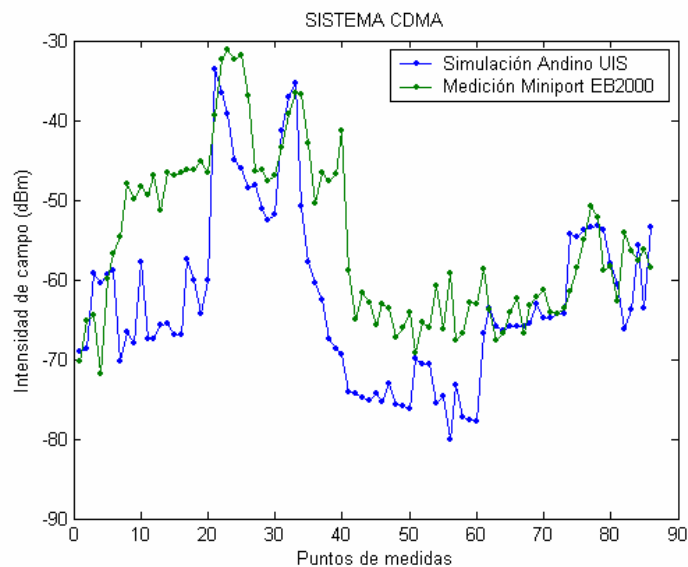


Ilustración 7.13 Puntos de medición para el sistema CDMA.

Con el objetivo de establecer parámetros puntuales sobre el nivel de predicción del modelo de propagación propuesto se ha realizado un análisis estadístico a los datos obtenidos de las mediciones y los datos obtenidos de las simulaciones. Éste análisis es presentado en las siguientes tablas desde la 7.1 hasta 7.6.

Los resultados también son comparados con los parámetros estadísticos presentados en las anteriores investigaciones: título, Anexo B tabla B.1 y Título, Anexo B tabla B.7 página 177.

- Para un sector del barrio Bucaramanga se obtuvo:

ANÁLISIS CON LAS SIMULACIONES SECTORIZADAS							
DESEMPEÑO DE LA SIMULACIÓN Vrs MEDIDAS							
RUTA	DIF. MIN	DIF. MAX	MEDIANA	PROMEDIO	STD	COEF.CORR.	VARIANZA
1	0,04037	12,739326	3,74086	4,61900	4,541035	0,58386	20,6210
2	4,8951	30,9804	14,3078	13,7055	7,319713	0,259678	53,5782
3	8,995	27,0368	4,93348	6,97165	7,974258	0,201354	63,5887
4	9,0208	52,633	7,88318	9,37683	5,793522	0,150624	33,5649
PROM.	7,4523	40,6655	7,71635	8,66825	6,407132	0,122891	42,8382

Tabla 7.1 Bucaramanga TDMA

ANÁLISIS CON LAS SIMULACIONES SECTORIZADAS							
DESEMPEÑO DE LA SIMULACIÓN Vrs MEDIDAS							
RUTA	DIF. MIN	DIF. MAX	MEDIANA	PROMEDIO	STD	COEF.COR	VARIANZ
1	0,415553	20,49350	14,07290	12,76956	6,908010	0,0004328	47,72061

Tabla 7.2 Bucaramanga CDMA

Para el barrio Bucaramanga en el sistema TDMA, fue obtenida una desviación estándar de 6.4dBm para los datos tomados en el sistema TDMA y 6.9dBm

para el sistema CDMA. Esto representa una mejora comparado con los resultados obtenidos en las anteriores investigaciones, en las cuales fueron registrados valores para la desviación estándar de 8.1dBm y 7.3dBm para los sistemas TDMA y CDMA respectivamente.

- Para un sector del barrio Provenza se obtuvo:

ANÁLISIS CON LAS SIMULACIONES SECTORIZADAS							
DESEMPEÑO DE LA SIMULACIÓN VrS MEDIDAS							
RUTA	DIF. MIN	DIF. MAX	MEDIANA	PROMEDIO	STD	COEF.CORR.	VARIANZA
1	1,20114	28,0073	9,0480	10,17402	7,513363	0,6245	56,450
2	0,69056	20,8747	10,204	10,53570	4,580138	0,48985	20,9776
PROM.	0,94585	24,4410	9,6264	10,35486	6,046750	0,0673	38,7141

Tabla 7.3 Provenza TDMA

ANÁLISIS CON LAS SIMULACIONES SECTORIZADAS							
DESEMPEÑO DE LA SIMULACIÓN VrS MEDIDAS							
RUTA	DIF. MIN	DIF. MAX	MEDIANA	PROMEDIO	STD	COEF.CORR.	VARIANZA
1	0,09561	33,6910	10,7298	12,00280	8,738008	0,4540	76,35279
2	0,3641	17,2381	5,5263	5,400026	3,778546	0,73739	14,27741
3	0,25392	18,2561	4,74942	6,481257	5,284061	0,52870	27,92130
PROM.	0,23787	23,0617	7,001865	7,961361	6,25827	0,63305	45,31510

Tabla 7.4 Provenza CDMA

En los sectores del barrio Provenza, se registra desviaciones estándar de 6dBm y 6.2dBm para los sistemas TDMA y CDMA respectivamente. Comparadas con las obtenidas anteriormente, 6.2dBm y 6.9dBm en los sistemas TDMA y CDMA, se observa cierta mejora, sin embargo se mantienen

dentro un rango muy semejante con un promedio de desviación estándar muy aceptable como nivel de predicción (6dBm).

- Para un sector del barío San Luís se obtuvo:

ANÁLISIS CON LAS SIMULACIONES SECTORIZADAS							
DESEMPEÑO DE LA SIMULACIÓN VrS MEDIDAS							
RUTA	DIF. MIN	DIF. MAX	MEDIANA	PROMEDIO	STD	COEF. CORR.	VARIANZA
1	0,0746	18,465	3,3389	5,429631	5,338072	0,108571	28,4950
2	0,5979	16,675	7,6684	7,688384	5,4976072	0,108571	30,2236
PROM.	0,33625	17,57	5,503	6,559007	5,417840	0,108571	29,3593

Tabla 7.5 San Luís TDMA

ANÁLISIS CON LAS SIMULACIONES SECTORIZADAS							
DESEMPEÑO DE LA SIMULACIÓN VrS MEDIDAS							
RUTA	DIF. MIN	DIF. MAX	MEDIANA	PROMEDIO	STD	COEF. CORR.	VARIANZA
1	0,112442	8,047382	0,967194	1,91717	2,16203	0,11857	4,67441
2	0,339038	12,1297	3,76114	4,39814	3,38844	0,029215	11,4815
PROM.	0,22574	10,0885	2,36416	3,15765	2,77524	0,073895	8,07800

Tabla 7.6 San Luís CDMA

Para el barrio San Luís en el sistema TDMA, fue obtenida una desviación estándar de 5.4dBm, lo cual representa una mejora si se compara con los 5.1dBm obtenidos en las anteriores investigaciones y una desviación estándar de 2.7dBm en el sistema CDMA comparado con 5.6dB .

Para el análisis se han considerado todos los datos muestrales, presentándose una desviación estándar de 5.14dBm para el sistema TDMA y una desviación estándar de 6.11dBm para el sistema CDMA.

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos de la presente investigación consistía en mejorar el nivel de predicción en la convergencia de calles o vías, se ha analizado los datos de las mediciones hechas en dichos entornos. De esta manera, del conjunto de datos muestrales fue tomada una muestra de medidas hechas en convergencias de vías. Se puede hacer referencia a ellas en la tabla B.7 del anexo B. Para éste conjunto de datos se obtuvo una desviación estándar de 8.34dBm (como se muestra en la tabla 7.7), lo cual representa un nivel aceptable de predicción.

DESEMPEÑO SIMULACION Vrs MEDIDAS						
DIF. MIN	DIF. MAX	MEDIANA	PROMEDIO	STD	COEF.CORR.	VARIANZA
0,3954	30,909	13,062	12,38776	8,347077	0,149796	69,67370

Tabla 7.7 Convergencias en Provenza y Diamante II

En la ilustración 7.14 se representan una muestra del conjunto de mediciones por punto hechas en convergencias de calles.

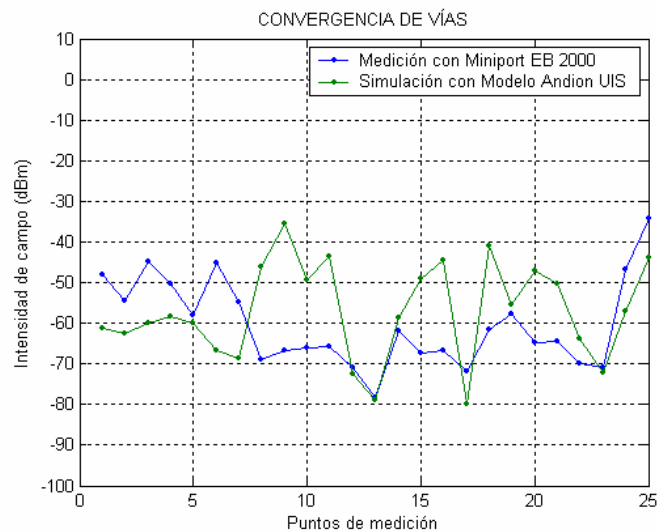


Ilustración 7.14 Puntos de medición en convergencia de vías.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Son varios los proyectos de investigación en el área de comunicaciones móviles llevados a cabo por el grupo de investigación RadioGIS perteneciente a la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, de la Universidad Industrial de Santander.

A través de éstas investigaciones se ha logrado establecer acuerdos de cooperación con diferentes grupos de investigación del país y de España, como son: : el I2T (Grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones) de la Universidad ICESI de Cali, GIDATI (Grupo de Investigación Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones e Informática) de la UPB (Universidad Pontificia Bolivariana) de Medellín, IIDTA (Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Aplicadas) de la Universidad de Pamplona, el Grupo de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones – GIDT – de la Universidad Francisco de Paula Santander de Cúcuta, y el Grupo de Comunicaciones Móviles de la Universidad Politécnica de Valencia en España. También se han logrado fortalecer los convenios de cooperación con la compañía TesAmerica Andina Ltda., y el Ministerio de Comunicaciones de Dirección territorial Bucaramanga.

A éste conjunto de trabajos desarrollados en cooperación con dichos grupos pertenece la presente tesis de fin de carrera, enfocado al área de radio propagación y al desarrollo de modelos de propagación propios para la región Andina. Este trabajo ha sido presentado con el título “Desarrollo del Modelo de propagación Andino UIS” como ponencia en varios eventos⁶⁰ y representa la

⁶⁰ **I Congreso de Ingeniería de Sistemas y Electrónica**, “Nuevas Tendencias en la globalización Tecnológica”, *Universitaria de Investigación y Desarrollo, Bucaramanga, Octubre 2004.*

II Seminario de convergencia de las Telecomunicaciones “*Tecnologías inalámbricas: una prioridad para Colombia*”, *Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Bucaramanga, Diciembre 2004.*

IV Congreso Internacional, “*Electrónica y Tecnologías Avanzadas*”, *Universidad de Pamplona., Pamplona, Marzo 2005.*

convergencia de todo un ciclo de desarrollos orientados a la creación de herramientas de simulación propias dedicadas a entornos Andinos..

8.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones han sido divididas en secciones de acuerdo al procedimiento llevado a cabo en la investigación y son presentadas a continuación.

8.1.1 Sobre la difracción en convergencias de vías.

El comportamiento de las señales de campo en un cruce de calles o convergencia de vías, es descrito a partir de la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD); en donde las esquinas son consideradas como los elementos difractores.

Para lograr describir la difracción de las ondas de radio en una esquina, es necesario contar con información sobre las características de los elementos difractores (i.e. las características dieléctricas). Como en la mayoría de los casos la información sobre el entorno es limitada y no se cuentan con bases de datos robustas, fue necesario reducir las formulaciones a un mínimo de parámetros (orientación y distancia en éste caso). Se generan campos constructivos o destructivos de acuerdo al valor de dichos parámetros, esto ocasiona un aumento o disminución del nivel de la señal.

Para entornos outdoor la posición del receptor con respecto a los elementos difractores no es un parámetro determinante en el mecanismo de difracción dentro de una convergencia, caso contrario para entornos indoor. Esto es debido principalmente a las distancias relativas manejadas en dichos entornos. En entornos outdoors se habla de cientos de metros, mientras que a nivel indoors se hace referencia a metros. Esto además influye en el protocolo de medición utilizado para la toma de muestras en cada uno de los entornos.

8.1.2 Sobre la teoría de difracción por cilindros.

Una de las características de los modelos de propagación semideterminísticos, es considerar en su desarrollo el entorno sobre el cual serán aplicados. El modelo de propagación Andino UIS fue desarrollado para un entorno semi-urbano por ser ésta la característica promedio de las ciudades ubicadas sobre la región Andina. Es orientado a microceldas outdoors con radios de coberturas menores a 1Km. Debido a estas características principalmente, la implementación de la teoría de difracción por múltiples filos de cuchillo haciendo uso de alturas de terreno referenciadas a la posición del receptor, fue viable y no hubo necesidad de implementar la teoría de difracción por cilindros para generar considerables mejoras en el nivel de predicción. En cambio, se deja claro que para sistemas diseñados para un entorno rural, en donde la señal de información debe ser transmitida a distancias en los órdenes de kilómetros, la implementación de la teoría por difracción de cilindros puede ser muy adecuada.

8.1.3 Sobre el patrón de radiación de las antenas y la tecnología.

Al considerar dentro del modelo Andino UIS el patrón de radiación de la antena, se origina un mayor nivel de predicción; ya que esto hace que se tenga en cuenta el tipo de antena utilizada por el transmisor y el tipo de sistema (i.e. TDMA sectorizado), esto aproximó mejor la predicción al sistema real.

8.1.4 Sobre el modelo de propagación Andino UIS

Se ha obtenido un modelo de propagación semideterminístico para la predicción de pérdidas de la señal electromagnética a nivel de entornos *Outdoor* en un sistema de red de acceso inalámbrico para la banda UHF, bajo consideraciones de un sistema sectorizado de tecnología inalámbrica móvil sobre un entorno tipo Andino. Incluye parámetros de orientación de vías, pérdidas por difracción múltiple, pérdidas por difracción final y consideraciones sobre convergencia de calles el cual ha dado resultados dentro del rango

permitido para este tipo de algoritmos. Se ha comprobado su desempeño mediante análisis estadístico y comparado con otros modelos de propagación, demostrando un mejor nivel de predicción principalmente en las convergencias de vías.

8.1.5 Sobre la implementación del modelo planteado.

En el proceso de adaptación del modelo a la herramienta de planificación, se ha logrado desarrollar un algoritmo eficiente que permite identificar edificios, vías y convergencias a partir de una matriz de datos. La importancia de esto radica en que actualmente la mayoría de los mapas digitales presentan la información como una sola matriz de datos de alturas, permitiéndose por medio de este procedimiento hacer un buen manejo de dicha información e incluso implementar nuevos modelos.

Se ha obtenido un modelo digital de ciudad del área metropolitana de Bucaramanga con resolución de 1 metro gracias a un acuerdo de cooperación con la Compañía TesAmérica Andina Ltda. y el cual ha mejorado el desempeño de las simulaciones.

Se concluyó que el tiempo de cómputo requerido por el algoritmo del modelo depende básicamente de la extensión del área de cobertura analizada y la resolución de la simulación. En el caso más crítico el tiempo de simulación no supera 4 minutos.

8.1.6 Sobre los resultados.

En promedio se obtuvo una desviación estándar de 6 dBm lo cual representa un nivel de predicción mejor al obtenido con los otros modelos empleados en las investigaciones anteriores que ya han sido referenciadas. Para la muestra seleccionada que representaba mediciones en convergencias, se obtuvo una desviación estándar promedio de 8 dBm lográndose así uno de los objetivos principales de la investigación. En general, el modelo de propagación Andino

UIS, presentó un buen nivel de predicción de la intensidad de campo tanto para el sistema TDMA como CDMA y en sectores críticos como colinas, cañones y convergencias de vías .

8.1.7 Sobre los alcances y logros.

Como aporte a la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander, se proporcionada además de los alcances interinstitucionales logrados, una herramienta de planificación actualizada con un mapa digital y un modelo de propagación propio, destinado a la instrucción en el área de las comunicaciones móviles.

Como aporte a la Universidad Industrial de Santander, se deja un precedente en la investigación de desarrollo de modelos de propagación para sistemas de comunicaciones móviles.

Como aporte al sector de las telecomunicaciones móviles, se presenta una opción para llevar a cabo mediciones de espectro o análisis de cobertura sobre entornos Andinos, con un mejorado nivel de predicción.

8.1.8 Sobre otros alcances.

Uno de los objetivos planteados por el autor de la presente investigación será, además de realizar las respectivas publicaciones, lograr que el COST incluya en sus resúmenes anuales el modelo desarrollado en la presente investigación.

Otro objetivo a lograr sería que el modelo fuese incluido dentro de las actualizaciones de las nuevas herramientas de planificación.

8.2 RECOMENDACIONES

Uno de los inconvenientes que se presentó durante la investigación fue lograr obtener información completa por parte de las compañías operadoras prestadoras de servicios de telefonía móvil. A través de convenios de cooperación entre Universidad-Empresa, se puede lograr obtener información para llevar a cabo investigaciones que ofrezcan beneficios hacia ambas partes. Es un proceso que se ha iniciado con éste tipo de trabajos, pero que requiere sobre todo de gestión por parte de los directivos de la Universidad.

Se recomienda realizar convenios con las empresas dedicadas a la planificación y optimización de sistemas de comunicación inalámbrica. A través de éstos se podría adquirir mapas digitales con todo tipo de información (clutters de población, densidad de tráfico, entornos, etc.) e incluso nuevas herramientas de planificación de tipo comercial. Hasta el momento en el grupo de investigación RadioGIS se ha trabajado con Cellview® no sólo debido a su flexibilidad si no también por ser la única herramienta con la que se cuenta. Aunque la mayoría permiten la adaptación de modelos, sería interesante pensar en los alcances que se lograrían con una herramienta más robusta.

La predicción en entornos indoors puede ser mejorada a través de la formulación UTD, obviamente, el protocolo de medición sería más estricto y habría necesidad de una base de datos más robusta que contuviera información sobre el entorno (características de las paredes, ventanas, puertas, etc.)

Se recomienda verificar el nivel de predicción del modelo en otro tipo de entorno diferente al Andino.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Anderson Harry R. *A Ray -Tracing Propagation Model for Digital Broadcast Systems in Urban Areas*, IEEE Trans. On Broadcasting, Vol 39, Number 3, Sept. 1993.

Anderson Harry R., *Building Corner Diffraction Measurements and Predictions Using UTD*, IEEE Trans. On Antennas and Propagation, Vol. 46, N° 2, February 1998.

C++, Universidad de Navarra, Escuela Superior de Estudios Industriales, San Sebastián Chile. 1998.

COST 231 Final report, *Digital Mobil Radio: COST 231 View on the Evolution Towards 3rd Generations Systems*, Commission of the European Communities and COST Telecommunications, Brussels, 1999.

Curso de Gestión de sistemas Inalámbricos. Ing. Daniel Rosas Tapia. CEO TESAMERICA., Bogotá, Colombia.2004.

Dongsoo Har, Alix M. Watson and Anthony G. Chadney, “ Comment on Diffraction Loss of Rooftop-to-Street in COST 231-Walfisch-Ikegami Model”, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol. 48, No. 5, September 1999.

Eliades D.E., *Terrain Simulation for the Cascaded Cylinder Diffraction Model*, IEE Proceedings-H, Vol., 140, N°4, August 1993.

F. Ikegami, T. Takeuchi, and S. Yoshida, “Theoretical Prediction of Mean Field Strength for Urban Mobile Radio,” *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 39, No. 3, 1991.

Feick R., Grote W., Hristov H., *Criterios y Procedimientos para Mediciones de Propagación Electromagnética en Ambientes Confinados*, Departamento

de Electrónica – Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

García Ariza Alexis P., *Cobertura para sistemas móviles celulares en entorno urbano escarpado*, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Bucaramanga, Colombia, 2002.

Henry L. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, USA: Prentice Hall PTR, 2000.

Joram Walfisch and Henry L. Bertoni, “A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments,” *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 36, No. 12, December 1988.

Lamppost and Panel Scattering Compared to Building Reflection and Diffraction, COST 259 Paper May 1997.

Leonard Piazzzi and Henry L. Bertoni, “Effect of Terrain on Path Loss in Urban Environments for Wireless Aplicatios”, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 46, No. 8, August 1998.

Mapa digital de Ciudad de Bucaramanga. Propiedad de TESAMERICA ANDINA Ltda., Bogotá Colombia.

P. Smulders, M. Jevrosimovic, M. Herben, S. Savov, E. Martijn, *Deliverable D2.1: State of the art channel models*, Technische Universiteit eindhoven, 14 Junio de 2002.

Recommendation ITU-R P.526-8 “Propagation by diffraction”.

S.R.Saunders and F.R. Bonar. “Prediction of Mobile Radio Wave Propagation Over Buildings of Irregular Heights and Spacings”. *IEEE*

transactions on Antennas and Propagation, Vol.42, No.2, February 1994, pp.137-144

Simon R. Saunders, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, Baffins Lane, Chichester, West Sussex U.K: John Wiley & Sons, Ltd., 1999.

Steven C. Chapra, Raymon P. Canale, *Métodos Numéricos para ingenieros*, McGraw-Hill, Mexico D.F. 2000.

Trappeniers D., Van Lil E., Van de Capelle A., *UTD Implementation for Cylindrical Obstacles*.

Vicente Roig Galán, “Planificación y Análisis de Sistemas de Comunicaciones Móviles de Tercera Generación Sobre CellView”, *Universidad Politécnica de Valencia*, Valencia España, 1996.

Whitteker James H., *Physical Optics and Field-Strength Predictions for Wireless Systems* , IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol. 20, N° 3, April 2002.

William C. Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*, USA: McGraw-Hill Book Company, 1997.

ANEXO A

SCRIPTS DE ARCVIEW MODIFICADOS

A continuación se presenta el listado de los Scripts de Arcview® GIS Versión 3.1 modificados y creados para la investigación.

Script1

```
' Script1
' Script de arranque del proyecto
Grid.SetAnalysisCellSize(#GRID_ENVTYPE_VALUE,2)
_dirinstal = "C:\\"
System.SetEnvVar("ARHOME","d:\temp")_dirinstal+"esri\pfc")
' Establezco la vista y el directorio de trabajo
Mapa_Valencia = av.GetProject.FindDoc("Valencia")
'Mapa_Valcen = av.GetProject.FindDoc("Valencia_centro")
Mapa_Mun = av.GetProject.FindDoc("Munich")
Mapa_ComuValen = av.GetProject.FindDoc("Comunidad Valenciana")
'Mapa_ValTerre = av.GetProject.FindDoc("Valencia+Terreno")
Mapa_Madrid = av.GetProject.FindDoc("Madrid")
Mapa_Bucaramanga = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga") ' Modificado por Paolo. Agrega mapa Bucaramanga.
Mapa_Bucaramanga_terr = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_terr")
Mapa_Bucaramanga_total = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_total")
Mapa_Bucaramanga_Metropolitana = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_Metropolitana") ' Modificado por Yair. Agrega mapa
Completo.
'win_valencia = Mapa_Valencia.GetWin
win_mun = Mapa_Mun.GetWin
if (win_mun.IsOpen) then
  win_mun.Close
end
win_madrid = Mapa_Madrid.GetWin
if (win_madrid.IsOpen) then
  win_madrid.Close
end
'win_valcen = Mapa_Valcen.GetWin 'No está activo
'if (win_valcen.IsOpen) then
' win_valcen.Close
'end
win_comuvalen = Mapa_ComuValen.GetWin
if (win_comuvalen.IsOpen) then
  win_comuvalen.Close
end
'win_valterre = Mapa_ValTerre.GetWin ' No está activo
'if (win_valterre.IsOpen) then
' win_valterre.Close
'end
win_valencia = Mapa_Valencia.GetWin
if (win_valencia.IsOpen) then
  win_valencia.Close
end
win_bucaramanga = Mapa_Bucaramanga.GetWin 'Agregado por Paolo.
if (win_bucaramanga.IsOpen) then
  win_bucaramanga.Close
end
win_bucaramanga_terr = Mapa_Bucaramanga_terr.GetWin 'Agregado por Paolo.
if (win_bucaramanga_terr.IsOpen) then
  win_bucaramanga_terr.Close
end
win_bucaramanga_total = Mapa_Bucaramanga_total.GetWin 'Agregado por Paolo.
if (win_bucaramanga_total.IsOpen) then
  win_bucaramanga_total.Close
end
win_bucaramanga_Metropolitana = Mapa_Bucaramanga_Metropolitana.GetWin 'Agregado por Yair.
if (win_bucaramanga_Metropolitana.IsOpen) then
  win_bucaramanga_Metropolitana.Close
end
'if (win_valencia.IsOpen.Not) then
' win_valencia.Open
'end
'win_valencia.Activate
'_Nombre_de_Vista = "Valencia"
```

```
'_Dir_trabajo = "valencia"
_entorno = "urbano"
'Inicializacion de variables globales
_defectobasedat = false
_primeravezplan = true
_hago_hand = false
av.FindDialog("dcell.Dial_Password").Open
av.FindDialog("dcell.sesion.elegirtipo").Open
```

cal_cob.ave: Se decide agregar el nuevo mapa “Bucaramanga_Metropolitana” bajo un entorno diferente a los existentes (rural, urbano y total), llamado entorno “metro”, esto es debido a la particularidad de trabajar un grid único para altimetrías del terreno y edificios.

```
'Primer script del calculo de coberturas
'Distingue el siguiente script segun el entorno
_calculando=0
_lista_simbolos = {}
if ((_Nombre_de_Vista = "Comunidad Valenciana") Or ( _Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_terr")) then
  _entorno = "rural"
  av.run("Calc_cob_grid", "")
end
'Modificado Paolo
if ((_Nombre_de_Vista = "Valencia+Terreno") Or ( _Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_total")) then
  _entorno = "total"
  _correc_K = 1.33
  av.run("Calc_cob_grid", "")
end
'Modificado Yair
'Se crea la nueva vista bajo el entorno "metro"
if ( _Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_Metropolitana") then
  _entorno = "metro"
  _correc_K = 1.33
  av.run("Calc_cob_grid", "")
end
if ((_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga") Or ( _Nombre_de_Vista = "Madrid") Or ( _Nombre_de_Vista = "Valencia") Or (
_Nombre_de_Vista = "Munich")) then
  _entorno = "urbano"
  _correc_K = 1.33
  av.run("Calc_cob_urbano", "")
end
```

calc_cob_grid.ave:

```
' Cal_cob_rural
'Llamada al diálogo correspste al Cálculo de Potencia en entorno rural, total y Metropolitano
'Selecciona únicamente el tema del grid de altimetria
theView = av.GetProject.FindDoc(_Nombre_de_Vista)
if ((theView.GetName = "Comunidad Valenciana") Or (theView.GetName = "Valencia+Terreno")) then
  for each t in theView.GetThemes
    if (t.GetName = "gridh") then
      t.SetActive(true)
      if (t.IsVisible.Not) then
        t.SetVisible(true)
      end
    else
      t.SetActive(false)
    end
  end
end
'Modifico Paolo
if (theView.GetName = "Bucaramanga_terr") then
  for each t in theView.GetThemes
    if (t.GetName = "gridh") then
      t.SetActive(true)
      if (t.IsVisible.Not) then
        t.SetVisible(true)
      end
    else
      t.SetActive(false)
    end
  end
end
```

```

if (theView.GetName = "Bucaramanga_total") then
  for each t in theView.GetThemes
    if (t.GetName = "gridh") then
      t.SetActive(true)
      if (t.IsVisible.Not) then
        t.SetVisible(true)
      end
    else
      t.SetActive(false)
    end
  if (t.GetName = "gridt") then
    t.SetActive(true)
    if (t.IsVisible.Not) then
      t.SetVisible(true)
    end
  else
    t.SetActive(false)
  end
  if (t.GetName = "gridv") then
    t.SetActive(true)
    if (t.IsVisible.Not) then
      t.SetVisible(true)
    end
  else
    t.SetActive(false)
  end
end
end
' Modificó Yair
if (theView.GetName = "Bucaramanga_Metropolitana") then
  for each t in theView.GetThemes
    if (t.GetName = "gridh") then
      t.SetActive(true)
      if (t.IsVisible.Not) then
        t.SetVisible(true)
      end
    else
      t.SetActive(false)
    end
  end
end
end
' Considerando que este script se usa para cálculo de coberturas y no de sectores
_EsSector = FALSE
av.GetProject.FindDialog("dcell.Dial_calc_cob1").Open

```

calcpot_a.ave:

```

' CalcPot_a
' Llama al script Prueba_de_grid para llamar a algoritmo en C
' Incluye el código para funcionar sobre edificios y terreno
theView = av.GetProject.FindDoc(_Nombre_de_Vista)
if (_entorno="total") then
  esEdificio = av.GetProject.FindDoc("Valencia").FindTheme("EsEdificio").GetGrid
  aPrj = av.GetProject.FindDoc("Valencia").GetProjection
  Grid.SetAnalysisExtent(#GRID_ENVTYPE_VALUE,_miRect)
  Grid.SetAnalysisCellSize(#GRID_ENVTYPE_VALUE,_TamCelda)
  parteEdificio = esEdificio.ExtractByRect(_miRect,aPrj,FALSE)
  noGrid = parteEdificio
  yesGrid = (0.0).AsGrid
  gr = parteEdificio.IsNull
  parteEdificio = gr.Con (yesGrid, noGrid)
  parteEdificio.Resample(_TamCelda,#GRID_RESTYPE_CUBIC)
  if (parteEdificio.HasError) then
    MsgBox.Error("Error in the distinction between buildings and land","Conversion Error")
  return NIL
end
' parteEdificio.SaveAsASCII((_dirinstal+"esri\pfc\esedif.txt").AsFileName)
end
' Cambia de directorio de trabajo según la vista usada para guardar ahí las coberturas
((_sesion+"DatosArcView\"+ _Dir_trabajo +"coberturas").AsFileName).SetCWD ' Establece directorio actual
' Modificado Paolo
if (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_total") then
  for each t in theView.GetThemes
    if (t.GetName = "gridh") then

```

```

    def1 = FileName.GetCWD.MakeTmp("nwgrd1","")
    t1 = t
elseif (t.GetName = "gridt") then
    def2 = FileName.GetCWD.MakeTmp("nwgrd2","")
    t2 = t
elseif (t.GetName = "gridv") then
    def3 = FileName.GetCWD.MakeTmp("nwgrd3","")
    t3 = t
else
    continue
end
end
av.Run("CalcPot_b_total",{t1,t2,t3,def1,def2,def3,theView})
' Modificado Yair
elseif (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_Metropolitana") then
for each t in theView.GetThemes
    if (t.GetName = "gridh") then
        def = FileName.GetCWD.MakeTmp("nwgrd","")
        t1 = t
        else
            continue
        end
    end
end
av.Run("CalcPot_b_metro",{t1,def,theView})
' El tipo de entorno sirve como bandera para llamar el DLL del algoritmo en C del Modelo Andino UIS
elseif ((_Nombre_de_Vista = "Munich") or (_Nombre_de_Vista = "Valencia") or (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga") or
(_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_terr") or (_Nombre_de_Vista = "Comunidad Valenciana") or (_Nombre_de_Vista =
"Madrid"))then
' bucle a través de cada tema activo
for each t in theView.GetActiveThemes
    def = FileName.GetCWD.MakeTmp("nwgrd","") ' Entra aquí
' conversion del tema a grid
if (t.GetClass.GetClassName = "FTheme") then
' Llamada a CalcPot_b
    av.Run("CalcPot_b",{t,def,theView})
elseif (t.GetClass.GetClassName = "ITheme") then
    av.Run("Surface.ImageToGrid",{t,def,theView})
elseif (t.GetClass.GetClassName = "GTheme") then
' Este será el caso de entorno abierto
    av.Run("CalcPot_b_grid",{t,def,theView})
elseif (t.GetClass.GetClassName = "STheme") then
    av.Run("Surface.TinToGrid",{t,def,theView})
else
    continue
end
end
end
theView.GetWin.Activate

```

calcpot_b_metro.ave: Script adicionado a Cellview para llevar a cabo la investigación.

```

' CalcPot_b_metro. Para el mapa Bucaramanga_Metropolitana
' Es para el caso en el que los datos de entrada vienen directamente como un grid
' Yair Ivan Carreño Lizarazo

```

```

t = SELF.Get(0)
def = SELF.Get(1)
theView = SELF.Get(2)

```

```

theDocName = theView.GetClass.GetClassName

```

```

'Genero una copia del grid, para evitar perdida de información en el grid original
'aFN = av.GetProject.GetWorkDir.MakeTmp("nwgrd","")
'Grid.SetVerify(#GRID_VERIFY_ON )
'ok = Grid.CopyDataSet(t.GetGrid.GetSrcName.GetFileName,def)
'if (ok.Not) then
' MsgBox.Error("Error during conversion","Convert to Grid :"+t.GetName)
' return NIL
'end
'gridSrc = Grid.MakeSrcName(def.AsString)

```

```

aGrid = t.GetGrid
if (aGrid.HasError) then
  MsgBox.Error("Error during conversion","Convert to Grid :")
end

'Establezco la extension y el tamaño de celda de grid en función del valor introducido
' por el usuario
Grid.SetAnalysisExtent(#GRID_ENVTYPE_VALUE,_miRect)
Grid.SetAnalysisCellSize(#GRID_ENVTYPE_VALUE,_TamCelda)
aPrj = theView.GetProjection
aGrid = aGrid.ExtractByRect(_miRect,aPrj,FALSE)
aGrid = av.run("dcell.grid_a_cero",{aGrid})
aGrid.Resample(_TamCelda,#GRID_RESTYPE_CUBIC)

numfils_y_cols = aGrid.GetNumRowsAndCols
_Diagramaant = 1
_Numfilas = numfils_y_cols.Get(0)
_Numcolumnas = numfils_y_cols.Get(1)

result = av.run("Creadat",{aGrid})

aGrid.SaveAsASCII((_dirinstal.AsString+"esri\pfc\h1.txt").AsFileName)
if (File.Exists((_dirinstal.AsString+"esri\pfc\h1.txt").AsFileName).Not) then
  MsgBox.Error("The grid can't be exported to ASCII","Convert to Grid :")
end

'eliminado = Grid.DeleteDataSet (aGrid.GetSrcName.GetFileName)
'if (eliminado.Not) then
'  MsgBox.Error("No se ha podido borrar el grid auxiliar nwgrd1.,"Convert to Grid :")
'end

' Cierro la caja de diálogo correspte al cálculo de cobertura
av.FindDialog("dcell.Dial_calc_cob2_total").Close

' En esta parte se llama el programa del Modelo Andino-UIS

dcell.dial_calc_cob1.lbt_cobtotal.ave:
'dcell.Dial_BaseDat_sectores.Incluir.lbt_cobtotal.Click
'Selecciona como zona de cobertura toda la extensión del mapa correspondiente

theView = av.GetProject.FindDoc(_Nombre_de_Vista)
theDisplay = theView.GetDisplay

'xminv = 725010 ' Bordes del tema vectorial valcen.shp (obtenidos con Theme.ReturnExtent)
'xmaxv = 727620 '- 5 ' El -5 es porque la altura si no, me da number null
'yminv = 4370990
'ymaxv = 4372500 '- 5

xminm = 3690200 ' Bordes del tema vectorial Munich_pol.shp
xmaxm = 3692600
yminm = 5336210
ymaxm = 5339600

xminval = 722252 ' Bordes del tema vectorial Valencia.shp
xmaxval = 730647
yminval = 4368880
ymaxval = 4375610

'if (_Nombre_de_Vista = "Valencia_centro") then ' No está activo. Modificado por Paolo.
' _miRect = Rect.MakeXY(xminv,ymaxv,xmaxv,yminv)
if (_Nombre_de_Vista = "Munich") then
  _miRect = Rect.MakeXY(xminm,ymaxm,xmaxm,yminm)
elseif (_Nombre_de_Vista = "Valencia") then
  _miRect = Rect.MakeXY(xminval,ymaxval,xmaxval,yminval)

'Modificó Paolo

elseif ((_Nombre_de_Vista = "Comunidad Valenciana") Or (_Nombre_de_Vista = "Madrid") Or (_Nombre_de_Vista =
"Bucaramanga") Or (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_terr") Or (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_total") Or
(_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_Metropolitana")) then

```

```

temaGrid = theView.FindTheme("gridh") ' Sin importar el entorno la base será el que esté en gridh. En Bucaramanga son los
edificios para todos los casos el máximo de área.
migrd = temaGrid.GetGrid
_miRect = migrd.GetExtent
end

_tengozona = true

```

dccell.dial_calc_cob1.tol_txor.apply.ave:

```

'dccell.Dial_calc_cob1.tol_txor.Apply
' Almacena la posicion del transmisor
' Script inicial = View.PointTool

tool_transmisor = av.FindDialog("dccell.Dial_calc_cob1").FindByName("Tool_txor")
tool_transmisor.SetEnabled(true)

theView = av.GetProject.FindDoc(_Nombre_de_Vista)
_pto = theView.GetDisplay.ReturnUserPoint ' Variable global
Xemplaz = _pto.GetX
Yemplaz = _pto.GetY

'No permite que se sitúen transmisores fuera del mapa
'xminv = 725010 ' Bordes del tema vectorial valcen.shp (obtenidos con Theme.ReturnExtent)
'xmaxv = 727620 - 5 ' El -5 es porque la altura si no, me da number null
'yminv = 4370990
'ymaxv = 4372500 - 5

xminm = 3690200 ' Bordes del tema vectorial Munich_pol.shp
xmaxm = 3692600
yminm = 5336210
ymaxm = 5339600

xminval = 722252 ' Bordes del tema vectorial Valencia.shp
xmaxval = 730647
yminval = 4368880
ymaxval = 4375610

if ((_Nombre_de_Vista = "Comunidad Valenciana") Or (_Nombre_de_Vista = "Madrid") Or (_Nombre_de_Vista =
"Bucaramanga") Or (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_terr") Or (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_total") Or
(_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_Metropolitana")) then
temaGrid = theView.FindTheme("gridh")
migrd = temaGrid.GetGrid
rect_grid = migrd.GetExtent
xmincomval = rect_grid.GetLeft
xmaxcomval = rect_grid.GetRight
ymincomval = rect_grid.GetBottom
ymaxcomval = rect_grid.GetTop
end

'if (_Nombre_de_Vista = "Valencia_centro") then 'No está habilitado
' if (Xemplaz < xminv) then Xemplaz = xminv end
' if (Xemplaz > xmaxv) then Xemplaz = xmaxv end
' if (Yemplaz > ymaxv) then Yemplaz = ymaxv end
' if (Yemplaz < yminv) then Yemplaz = yminv end
if (_Nombre_de_Vista = "Munich") then
if (Xemplaz < xminm) then Xemplaz = xminm end
if (Xemplaz > xmaxm) then Xemplaz = xmaxm end
if (Yemplaz > ymaxm) then Yemplaz = ymaxm end
if (Yemplaz < yminm) then Yemplaz = yminm end
elseif (_Nombre_de_Vista = "Valencia") then
if (Xemplaz < xminval) then Xemplaz = xminval end
if (Xemplaz > xmaxval) then Xemplaz = xmaxval end
if (Yemplaz > ymaxval) then Yemplaz = ymaxval end
if (Yemplaz < yminval) then Yemplaz = yminval end

'Modificado Paolo

```

```

elseif ((_Nombre_de_Vista = "Comunidad Valenciana") Or (_Nombre_de_Vista = "Madrid") Or (_Nombre_de_Vista =
"Bucaramanga") Or (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_terr") Or (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_total") Or
(_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_Metropolitana")) then
  if (Xemplaz < xmincomval) then Xemplaz = xmincomval end
  if (Xemplaz > xmaxcomval) then Xemplaz = xmaxcomval end
  if (Yemplaz > ymaxcomval) then Yemplaz = ymaxcomval end
  if (Yemplaz < ymincomval) then Yemplaz = ymincomval end
end

```

```
_pto = (Xemplaz@Yemplaz)
```

```

' Actualiza el valor de las coordenadas en sus líneas de texto respectivas
caja_dialog = av.FindDialog("dcell.Dial_calc_cob1")
txlx = caja_dialog.FindByName("Txl_X")
txlx.SetText(_pto.GetX.AsString)
txly = caja_dialog.FindByName("Txl_Y")
txly.SetText(_pto.GetY.AsString)

```

```
theTheme = theView.GetEditableTheme
```

```

if (theTheme <> nil) then      ' En el then no entra
  thePrj = theView.GetProjection
  if (thePrj.IsNull.Not) then
    _pto = _pto.ReturnUnprojected(thePrj)
  end
  theField = theTheme.GetFTab.FindField("Shape")
  theTheme.GetFTab.BeginTransaction
  rec = theTheme.GetFTab.AddRecord
  theTheme.GetFTab.SetValue(theField, rec, _pto)
  theTheme.GetFTab.EndTransaction
  theTheme.GetFTab.GetSelection.ClearAll
  theTheme.GetFTab.GetSelection.Set(rec)
  theTheme.GetFTab.UpdateSelection
else
  'MsgBox.Info("vale nil", "") ' Entra aquí
  micirculo = Circle.Make(_pto,20)
  _pto_simbolo = GraphicShape.Make(micirculo)
  listasimbolospaleta = av.GetSymbolWin.GetPalette.GetList(#PALETTE_LIST_PEN)
  sitesimbolo = listasimbolospaleta.Get(0).Clone
  sitesimbolo.SetColor(color.GetYellow)
  sitesimbolo.SetSize(6)
  _pto_simbolo.SetSymbol(sitesimbolo)

  theView.GetGraphics.UnselectAll
  _pto_simbolo.SetSelected(TRUE)
  theView.GetGraphics.Add(_pto_simbolo)
end
av.GetProject.SetModified(true)
_lista_simbolos.Add(_pto)

```

```

' activo el tool del txor
tool_transmisor.SetEnabled(true) ' Antes a false

```

```

' Llamada al script de sistema View.SelectTool ( activa el puntero normal )
'theView = av.GetActiveDoc
'theView.SetSelectMode(#GRAPHICS_SELECT_NORMAL)

```

```
av.FindDialog("dcell.Dial_calc_cob1").Restore
```

dcell.dial_calc_cob1.txl_y.apply.ave:

```

'dcell.Dial_calc_cob1.txl_y.Apply
' Almacena la coordenada y y el punto del emplazamiento

```

```

_miutmy=self.GetText
_miutmy = _miutmy.AsNumber

```

```
theView = av.GetProject.FindDoc(_Nombre_de_Vista)
```

```

txl_x = av.GetProject.FindDialog("dcell.Dial_Calc_cob1").FindByName("Txl_X")
txl_y = av.GetProject.FindDialog("dcell.Dial_Calc_cob1").FindByName("Txl_Y")
if (txl_x.IsEmpty) then
  txl_y.SetText("")
  MsgBox.Info("You must fill the X coordinate before the Y coordinate","WARNING")
  exit
end

_pto=(_miutmX)@(_miutmY)
Xemplaz = _pto.GetX
Yemplaz = _pto.GetY

'No permite que se sitúen transmisores fuera del mapa
'xminv = 725010 ' Bordes del tema vectorial valcen.shp (obtenidos con Theme.ReturnExtent)
'xmaxv = 727620 - 5 ' El -5 es porque la altura si no, me da number null
'yminv = 4370990
'ymaxv = 4372500 - 5

xminm = 3690200 ' Bordes del tema vectorial Munich_pol.shp
xmaxm = 3692600
yminm = 5336210
ymaxm = 5339600

xminval = 722252 ' Bordes del tema vectorial Valencia.shp
xmaxval = 730647
yminval = 4368880
ymaxval = 4375610

' Modifico Paolo

if ((_Nombre_de_Vista = "Comunidad Valenciana") Or (_Nombre_de_Vista = "Madrid") Or (_Nombre_de_Vista =
"Bucaramanga") Or (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_terr") Or (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_total") Or
(_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_Metropolitana")) then
  temaGrid = theView.FindTheme("gridh")
  migrid = temaGrid.GetGrid
  rect_grid = migrid.GetExtent
  xmincomval = rect_grid.GetLeft
  xmaxcomval = rect_grid.GetRight
  ymincomval = rect_grid.GetBottom
  ymaxcomval = rect_grid.GetTop
end

'if (_Nombre_de_Vista = "Valencia_centro") then
' if (Xemplaz < xminv) then Xemplaz = xminv end
' if (Xemplaz > xmaxv) then Xemplaz = xmaxv end
' if (Yemplaz > ymaxv) then Yemplaz = ymaxv end
' if (Yemplaz < yminv) then Yemplaz = yminv end
if (_Nombre_de_Vista = "Munich") then
  if (Xemplaz < xminm) then Xemplaz = xminm end
  if (Xemplaz > xmaxm) then Xemplaz = xmaxm end
  if (Yemplaz > ymaxm) then Yemplaz = ymaxm end
  if (Yemplaz < yminm) then Yemplaz = yminm end
elseif (_Nombre_de_Vista = "Valencia") then
  if (Xemplaz < xminval) then Xemplaz = xminval end
  if (Xemplaz > xmaxval) then Xemplaz = xmaxval end
  if (Yemplaz > ymaxval) then Yemplaz = ymaxval end
  if (Yemplaz < yminval) then Yemplaz = yminval end
elseif ((_Nombre_de_Vista = "Comunidad Valenciana") Or (_Nombre_de_Vista = "Madrid") Or (_Nombre_de_Vista =
"Bucaramanga") Or (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_terr") Or (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_total") Or
(_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_Metropolitana"))then
  if (Xemplaz < xmincomval) then Xemplaz = xmincomval end
  if (Xemplaz > xmaxcomval) then Xemplaz = xmaxcomval end
  if (Yemplaz > ymaxcomval) then Yemplaz = ymaxcomval end
  if (Yemplaz < ymincomval) then Yemplaz = ymincomval end
end

_pto = (Xemplaz@Yemplaz)

'Dibujo el pto en el mapa (sacado de tol_txor.Apply)
theView = av.GetProject.FindDoc(_Nombre_de_Vista)

```

```

micirculo = Circle.Make(_pto,20)
_pto_simbolo = GraphicShape.Make(micirculo)
listasimbolospaleta = av.GetSymbolWin.GetPalette.GetList(#PALETTE_LIST_PEN)
sitesimbolo = listasimbolospaleta.Get(0).Clone
sitesimbolo.SetColor(color.GetYellow)
sitesimbolo.SetSize(6)
_pto_simbolo.SetSymbol(sitesimbolo)

theView.GetGraphics.UnselectAll
_pto_simbolo.SetSelected(TRUE)
theView.GetGraphics.Add(_pto_simbolo)
_lista_simbolos.Add(_pto)
av.GetProject.SetModified(true)

```

dccell.Dial_calc_cob2_total.lbt_Aandinouis.Click: Este Script es creado a partir de la modificación del script *dccell.Dial_calc_cob2_total.lbt_sbutotal.Click* con el fin de habilitar en la herramienta, el modelo AndinoUIS.

```

'dccell.Dial_calc_cob2_total.lbt_Aandinouis.Click
'Almacenamiento de la cobertura en la tabla de sectores y llamada al cálculo de cobertura
'con el método del modelo Andino UIS

```

```

_Metodo = "ANDINOUIS"

```

```

'Modificó Yair. El modelo es habilitado en "Bucaramanga_Metropolitana".

```

```

av.run("dccell.Guardar_cob_en_tabla",{})
av.run("CalcPot_a",{})

```

calcpot_c.ave:

```

' CalcPot_c
' Crea el grid de potencia y lo graba en el directorio correspondiente

theView=self.Get(0)

' Encuentra el nombre de salida para el grid, distinguiendo entre nombre de cobertura y de sector

gridmod = Grid.MakeFromASCII ((_dirinstal.Asstring+"esri\pfc\e1.txt").AsFileName,true)
if (_EsSector = true) then
  ' gridFN = (_sesion+"DatosArcView\"+_Dir_trabajo+"\coberturas\"+(_Nomsector)).AsFileName
  gridFN = (_sesion.AsString+"DatosArcView\"+_Dir_trabajo+"\coberturas\"+(_Nomsector)).AsFileName
else
  ' gridFN = (_sesion+"DatosArcView\"+_Dir_trabajo+"\coberturas\"+(_NomCobertura)).AsFileName
  gridFN = (_sesion.AsString+"DatosArcView\"+_Dir_trabajo+"\coberturas\"+(_NomCobertura)).AsFileName
end
MsgBox.Info("Cell saved as "+gridFN.AsString,"")

' Graba el conjunto de datos con el nombre elegido
if (File.Exists((_dirinstal.asstring+"esri\pfc\e1.txt").AsFileName)) then
  status = Grid.GetVerify
  Grid.SetVerify(#GRID_VERIFY_ON ) ' Permite sobreescritura si lo desea el usuario
  if (gridmod.SaveDataSet(gridFN).Not) then
    Grid.SetVerify(status)
  end
else MsgBox.Info("File e1.txt does not exists","")
end

' En caso de error
if (gridmod.HasError) then
  MsgBox.Error("File e1.txt can't be imported as a grid", "Import Error")
end

'Elimino archivos txt
nombre1 = (_dirinstal.AsString+"esri\pfc\fdatosav.txt").AsFileName

```

```

File.Delete(nombre1)
nombre2 = (_dirinstal.AsString+"esri\pfc\h1.txt").AsFileName
File.Delete(nombre2)
nombre3 = (_dirinstal.AsString+"esri\pfc\h2.txt").AsFileName
File.Delete(nombre3)

'Modificó Paolo

if (theView.GetName = "Bucaramanga_total") then
nombre4 = (_dirinstal.AsString+"esri\pfc\h2.txt").AsFileName
File.Delete(nombre4)
nombre5 = (_dirinstal.AsString+"esri\pfc\h3.txt").AsFileName
File.Delete(nombre5)
end

'Añadir el grid ?
if (MsgBox.YesNo("Add cell grid to " ++ theView.GetName + "?","Importar Data Source : " ++ gridFN.GetBaseName,TRUE)) then
miGTema=GTheme.Make(gridmod)
miGTema.GetGraphics.Add(_pto_simbolo)
miGTema.GetGraphics.Add(_flecha_acim)
laLeyenda = miGTema.GetLegend
escala = 25000
if (_Nombre_de_Vista = "Valencia") then
escala = 100000
elseif (_Nombre_de_Vista = "Munich") then
escala = 40000
elseif (_Nombre_de_Vista = "Madrid") then
escala = 1000
elseif (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga") then 'Modificó Paolo
escala = 15000
elseif (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_terr") then 'Modificó Paolo
escala = 15000
elseif (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_total") then 'Modificó Paolo
escala = 15000
elseif (_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_Metropolitana") then 'Modificó Yair
escala = 15000
end
laLeyenda.SetRefScale (escala)
laLeyenda.SetScaleSymbols (true)

if (_EsSector = true) then
miGTema.SetName(_NomSector+" (dBm)")
else
miGTema.SetName(_NomCobertura+" (dBm)")
end
theView.AddTheme(miGTema)
miGTema.SetVisible(true)
end

' Coloca contorno.shp arriba del todo
theTheme = theView.FindTheme("contorno.shp")
if ((theTheme = nil).Not) then
theThemeList = theView.GetThemes
theThemeList.Shuffle(theTheme,0)
theView.InvalidateTOC(nil)
theView.GetDisplay.Invalidate(true)
theTheme.SetVisible(true)
end
exit

dccell.Dial_Calc_cob3.lbt_Siguiente.Click

'dccell.Dial_Calc_cob3.lbt_Siguiente.Click
' Permite cargar el siguiente panel asociado con la orden Calcular cobertura

theView = av.getProject.FindDoc(_Nombre_de_Vista)

eldialog = av.FindDialog("dccell.Dial_Calc_cob3")

if (_diagrama.IsNull) then
MsgBox.Info("You must select a diagram before continuing", "Warning")
return nil
end

```

```

txlacimut = eldialog.FindByName("TxI_Acimut")
_Acimut = txlacimut.GetText
if (_Acimut.IsNumber) then
  _Acimut = _Acimut.AsNumber
else
  MsgBox.Info("The azimuth is in a wrong format", "Warning")
  return nil
end
'CORRECCION: NORTE = 0 GRADOS
_Acimut = 90 - _Acimut
while (_Acimut < 0)
  _Acimut = _Acimut + 360
end
while (_Acimut >= 360)
  _Acimut = _Acimut - 360
end

inclinatext = eldialog.FindByName("TxI_Incl")
inclina = inclinatext.GetText
if (inclina.IsNumber) then
  _Inclinacion = inclina.AsNumber
else
  MsgBox.Info("The Down-Tilt is in a wrong format", "Warning")
  return nil
end

' Dibuja el emplazamiento sobre el mapa
'_flecha_acim = GraphicShape.Make(_pto)
'listasimbolospaleta = av.GetSymbolWin.GetPalette.GetList(#PALETTE_LIST_MARKER)
'flechasimbolo = listasimbolospaleta.Get(51).Clone
'flechasimbolo.SetColor(color.GetYellow)
'flechasimbolo.SetSize(24)
'orientado = _Acimut - 90
'if (orientado<0) then
'  orientado = orientado + 360
'end
'flechasimbolo.SetAngle(orientado)
'_flecha_acim.SetSymbol(flechasimbolo)
'theView.GetGraphics.UnselectAll
'theView.GetGraphics.Add(_flecha_acim)

temaGrid = theView.FindTheme("gridh")
migrd = temaGrid.GetGrid
resolu = migrd.GetCellSize

otroptox = _pto.GetX + (75*resolu*((_Acimut.AsRadians).Cos))
otroptoy = _pto.GetY + (75*resolu*((_Acimut.AsRadians).Sin))
otropto = otroptox@otroptoy
'MsgBox.Info("Pto ini X ="+_pto.GetX.AsString+NL+"Pto ini Y ="+_pto.GetY.AsString+NL+"Pto fin X
="+otropto.GetX.AsString+NL+"Pto fin Y ="+otropto.GetY.AsString, "")
'MsgBox.Info("Resolu = "+resolu.AsString+NL+"acimut = "+_Acimut.AsString+NL+otroptox.AsString+NL+otroptoy.AsString, "")
miflecha = Line.Make(_pto, otropto)
_flecha_acim = GraphicShape.Make(miflecha)
listasimbolospaleta = av.GetSymbolWin.GetPalette.GetList(#PALETTE_LIST_PEN)
flechasimbolo = listasimbolospaleta.Get(0).Clone
flechasimbolo.SetColor(color.GetYellow)
flechasimbolo.SetSize(3)
_flecha_acim.SetSymbol(flechasimbolo)
theView.GetGraphics.UnselectAll
theView.GetGraphics.Add(_flecha_acim)

av.GetProject.FindDialog("dcell.Dial_Calc_cob3").Close
if (_entorno = "rural") then
  av.GetProject.FindDialog("dcell.Dial_Calc_cob2_rural").Open
elseif (_entorno = "total") then
  av.GetProject.FindDialog("dcell.Dial_Calc_cob2_total").Open
elseif (_entorno = "metro") then
  av.GetProject.FindDialog("dcell.Dial_Calc_cob2_total").Open
else
  av.GetProject.FindDialog("dcell.Dial_Calc_cob2").Open
end

```

dccell.Dial_calc_cob2_total.open.ave

```
' dccell.Dial_calc_cob2_total.Open
' Inicializa las líneas de texto a un valor vacío
if (_PIRE.AsString.IsNumber) then
  LineaTexto1 = self.FindByName("Tx1_pire")
  LineaTexto1.SetText(_PIRE.AsString)
  LineaTexto2 = self.FindByName("Tx1_htx")
  LineaTexto2.SetText(_Alturax.AsString)
  LineaTexto3 = self.FindByName("Tx1_hrx")
  LineaTexto3.SetText(_Alturarx.AsString)
  LineaTexto4 = self.FindByName("tx1_frec")
  LineaTexto4.SetText(_Frecuencia.AsString)
  LineaTexto5 = self.FindByName("tx1_tamcelda")
  LineaTexto5.SetText(_Tamcelda.AsString)
  LineaTexto6 = self.FindByName("tx1_Grx")
  LineaTexto6.SetText(_Ganancia_rxor.AsString)
else
  LineaTexto1 = self.FindByName("Tx1_pire")
  LineaTexto1.SetText("30")
  _PIRE=30
  LineaTexto2 = self.FindByName("Tx1_htx")
  LineaTexto2.SetText("10")
  _Alturax=10
  LineaTexto3 = self.FindByName("Tx1_hrx")
  LineaTexto3.SetText("1.7")
  _Alturarx=1.7
  LineaTexto4 = self.FindByName("tx1_frec")
  LineaTexto4.SetText("900")
  _Frecuencia=900
  LineaTexto5 = self.FindByName("tx1_tamcelda")
  LineaTexto5.SetText("4")
  _Tamcelda=4
  LineaTexto6 = self.FindByName("tx1_Grx")
  LineaTexto6.SetText("0")
  _Ganancia_rxor=0
end

' Muestra la altura del edificio donde está el transmisor
theView = av.GetProject.FindDoc(_Nombre_de_Vista)
NombreVista = theView.GetName
temaGrid = theView.FindTheme("gridh")
migrd = temaGrid.GetGrid
Etiqueta_htotal = self.FindByName("eti_q_htotal")
unaPrj = Prj.MakeNull ' Si ya esta proyectado el pto, puedo hacer esto al usar CellValue ( viene en la ayuda )
alt = (migrd.CellValue (_pto, unaPrj))
_aldedif = (migrd.CellValue (_pto, unaPrj))
if ((_aldedif.IsNull) or (alt.IsNull)) then ' Se da para Munich, Valencia y Bucramanga_total
  _aldedif = 0
  alt = 0
end

Etiqueta_htotal.SetLabel("Building height (m) = "++ (alt.AsString))

'Modificó Yair

if (_entorno ="total") then

'Si existe grid del terreno muestra la altura del terreno donde está el transmisor
temaGrid = theView.FindTheme("gridt")
migrd = temaGrid.GetGrid
Etiqueta_hterreno = self.FindByName("eti_q_hterreno")
unaPrj = Prj.MakeNull ' Si ya esta proyectado el pto, puedo hacer esto al usar CellValue ( viene en la ayuda )
alt2 = (migrd.CellValue (_pto, unaPrj))

Etiqueta_hterreno.SetLabel("Land height (m) = "++ (alt2.AsString))
End
```

dccell.cambiar_a_plano_de_bucaramanga.ave

```
' dccell.Cambiar_a_Plano_de_Bucaramanga
' Cambia la visualización al plano de Bucaramanga y cambia el directorio de trabajo

_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga"
_Dir_trabajo = "Bucaramanga"
dirmapa = (_sesion+"Datosarcview\"+_Dir_trabajo).AsFileName
if (File.Exists(dirmapa).Not) then
  if (MsgBox.YesNo("Map of"++_Nombre_de_Vista++"is not loaded in your session."+NL
    +"Would you like to load it now?","WARNING",true) ) then
    av.Run("dccell.sesion.cargaencambiademapa",{ })
  else
    MsgBox.Info("Can´t change to map of"++_nombre_de_Vista,"")
  exit
end
end

Mapa_Mun = av.GetProject.FindDoc("Munich")
'Mapa_Valcen = av.GetProject.FindDoc("Valencia_centro")
Mapa_Valencia = av.GetProject.FindDoc("Valencia")
Mapa_ComuValen = av.GetProject.FindDoc("Comunidad Valenciana")
'Mapa_ValTerre = av.GetProject.FindDoc("Valencia+Terreno")
Mapa_Madrid = av.GetProject.FindDoc("Madrid")
Mapa_Bucaramanga = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga")
Mapa_Bucaramanga_terr = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_terr")
Mapa_Bucaramanga_total = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_total")
Mapa_Bucaramanga_Metropolitana = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_Metropolitana")

win_mun = Mapa_Mun.GetWin
'win_valcen = Mapa_Valcen.GetWin
win_valencia = Mapa_Valencia.GetWin
win_comuvalen = Mapa_ComuValen.GetWin
'win_valterre = Mapa_ValTerre.GetWin
win_madrid = Mapa_Madrid.GetWin
win_bucaramanga = Mapa_Bucaramanga.GetWin
win_bucaramanga_terr = Mapa_Bucaramanga_terr.GetWin
win_bucaramanga_total = Mapa_Bucaramanga_total.GetWin
win_bucaramanga_Metropolitana = Mapa_Bucaramanga_Metropolitana.GetWin

if (win_bucaramanga.IsOpen.Not) then
  win_bucaramanga.Open
end

if (win_valencia.IsOpen) then
  win_valencia.Close ' Al cerrar la vista también se cierra su overview
elseif (win_valcen.IsOpen) then
  win_valcen.Close
elseif (win_comuvalen.IsOpen) then
  win_comuvalen.Close
elseif (win_valterre.IsOpen) then
  win_valterre.Close
elseif (win_madrid.IsOpen) then
  win_madrid.Close
elseif (win_mun.IsOpen) then
  win_mun.Close
elseif (win_bucaramanga_terr.IsOpen) then
  win_bucaramanga_terr.Close
elseif (win_bucaramanga_total.IsOpen) then
  win_bucaramanga_total.Close
elseif (win_bucaramanga_Metropolitana.IsOpen) then
  win_bucaramanga_Metropolitana.Close
end

win_bucaramanga.Activate ' Queda activa la última ventana en activarse
_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga"
_Dir_trabajo = "Bucaramanga"
_entorno = "urbano"
mascararect = av.GetProject.FindDoc(_Nombre_de_Vista).FindTheme("gridh").GetGrid.GetExtent
```

```

Grid.SetAnalysisExtent(#GRID_ENVTYPE_VALUE,mascararect)
mascara = 1.AsGrid
Grid.SetAnalysisMask(mascara)

```

dccell.cambiar_a_plano_de_bucaramanga_Metropolitana.ave: Script adicionado a Cellview para llevar a cabo la investigación

```

'dccell.Cambiar_a_Plano_de_Bucaramanga_Metropolitana
' Cambia la visualización al plano de Bucaramanga_Metropolitana y cambia el directorio de trabajo

```

```

_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_Metropolitana"
_Dir_trabajo = "Bucaramanga_Metropolitana"
dirmapa = (_sesion+"Datosarcview\"+_Dir_trabajo).AsFileName
if (File.Exists(dirmapa).Not) then
  if (MsgBox.YesNo("Map of"++_Nombre_de_Vista++"is not loaded in your session."+NL
    +"Would you like to load it now?","WARNING",true) ) then
    av.Run("dccell.sesion.cargaencambiodemapa",{ })
  else
    MsgBox.Info("Can´t change to map of"++_nombre_de_Vista,"")
    exit
  end
end
end

```

```

Mapa_Mun = av.GetProject.FindDoc("Munich")
'Mapa_Valcen = av.GetProject.FindDoc("Valencia_centro")
Mapa_Valencia = av.GetProject.FindDoc("Valencia")
Mapa_ComuValen = av.GetProject.FindDoc("Comunidad Valenciana")
'Mapa_ValTerre = av.GetProject.FindDoc("Valencia+Terreno")
Mapa_Madrid = av.GetProject.FindDoc("Madrid")
Mapa_Bucaramanga = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga")
Mapa_Bucaramanga_terr = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_terr")
Mapa_Bucaramanga_total = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_total")
Mapa_Bucaramanga_Metropolitana = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_Metropolitana")

```

```

win_mun = Mapa_Mun.GetWin
'win_valcen = Mapa_Valcen.GetWin
win_valencia = Mapa_Valencia.GetWin
win_comuvalen = Mapa_ComuValen.GetWin
'win_valterre = Mapa_ValTerre.GetWin
win_madrid = Mapa_Madrid.GetWin
win_bucaramanga = Mapa_Bucaramanga.GetWin
win_bucaramanga_terr = Mapa_Bucaramanga_terr.GetWin
win_bucaramanga_total = Mapa_Bucaramanga_total.GetWin
win_bucaramanga_Metropolitana = Mapa_Bucaramanga_Metropolitana.GetWin

```

```

if (win_bucaramanga_Metropolitana.IsOpen.Not) then
  win_bucaramanga_Metropolitana.Open
end

```

```

if (win_valencia.IsOpen) then
  win_valencia.Close ' Al cerrar la vista también se cierra su overview
elseif (win_valcen.IsOpen) then
  win_valcen.Close
elseif (win_comuvalen.IsOpen) then
  win_comuvalen.Close
elseif (win_valterre.IsOpen) then
  win_valterre.Close
elseif (win_madrid.IsOpen) then
  win_madrid.Close
elseif (win_mun.IsOpen) then
  win_mun.Close
elseif (win_bucaramanga.IsOpen) then
  win_bucaramanga.Close
elseif (win_bucaramanga_terr.IsOpen) then
  win_bucaramanga_terr.Close
elseif (win_bucaramanga_total.IsOpen) then
  win_bucaramanga_total.Close
end

```

```

win_bucaramanga_Metropolitana.Activate 'Queda activa la última ventana en activarse
_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_Metropolitana"
_Dir_trabajo = "Bucaramanga_Metropolitana"
_entorno = "metro"
mascararect = av.GetProject.FindDoc(_Nombre_de_Vista).FindTheme("gridh").GetGrid.GetExtent
Grid.SetAnalysisExtent(#GRID_ENVTYPE_VALUE,mascararect)
mascara = 1.AsGrid
Grid.SetAnalysisMask(mascara)

```

(Los siguientes 8 scripts relacionados, tienen modificaciones análogas)

dccell.cambiar_a_plano_de_bucaramanga_terr.ave

dccell.cambiar_a_plano_de_bucaramanga_total.ave

dccell.cambiar_a_plano_de_comunidad_valenciana.ave

dccell.cambiar_a_plano_de_madrid.ave

dccell.cambiar_a_plano_de_valencia.ave

dccell.cambiar_a_plano_de_valencia+terreno.ave

dccell.cambiar_a_plano_de_munich.ave

dccell.cambiar_a_plano_de_valcen.ave

dccell.dial_tems.adapta.fin.aceptar.click.ave

'Crea los datos para dccell.Dial_TEMS.Adapta.Prog1

```

eldialog = av.GetProject.FindDialog("dccell.Dial_TEMS.Adapta.Fin")
xtext = eldialog.FindByName("xcoorlineatexto")
xcoorlin = xtext.GetText.AsNumber

ytext = eldialog.FindByName("ycoorlineatexto")
ycoorlin = ytext.GetText.AsNumber

_pto= (xcoorlin @ ycoorlin)

celdatext = eldialog.FindByName("resolution")
_TamCelda = celdatext.GetText.AsNumber

downtext = eldialog.FindByName("Down_Tilt")
_Inclinacion = downtext.GetText.AsNumber

frectext = eldialog.FindByName("frec")
_Frecuencia = frectext.GetText.AsNumber

altTXtext = eldialog.FindByName("pole_height")
_Alturax = altTXtext.GetText.AsNumber

altRXtext = eldialog.FindByName("rx_height")
_Alturax = altRXtext.GetText.AsNumber

acitext = eldialog.FindByName("Tx1_Acimut")
_Acimut = acitext.GetText.AsNumber

piretext = eldialog.FindByName("pire")
_PIRE = piretext.GetText.AsNumber

```

' Selecciona únicamente el tema vectorial

' Modificó Paolo

```
theView = av.GetProject.FindDoc(_Nombre_de_Vista)
'if (theView.GetName = "Valencia_centro") then
' for each t in theView.GetThemes
' if (t.GetName = "Valcen.shp") then
' t.SetActive(true)
' if (t.IsVisible.Not) then
' t.SetVisible(true)
' end
' else
' t.SetActive(false)
' end
' end
if (theView.GetName = "Munich") then
for each t in theView.GetThemes
if (t.GetName = "Munich_pol.shp") then
t.SetActive(true)
if (t.IsVisible.Not) then
t.SetVisible(true)
end
else
t.SetActive(false)
end
end
elseif (theView.GetName = "Valencia") then
for each t in theView.GetThemes
if (t.GetName = "Valencia.shp") then
t.SetActive(true)
if (t.IsVisible.Not) then
t.SetVisible(true)
end
else
t.SetActive(false)
end
end
elseif (theView.GetName = "Madrid") then
for each t in theView.GetThemes
if (t.GetName = "gridh") then
t.SetActive(true)
if (t.IsVisible.Not) then
t.SetVisible(true)
end
else
t.SetActive(false)
end
end
elseif (theView.GetName = "Bucaramanga") then
for each t in theView.GetThemes
if (t.GetName = "Bucaramanga.shp") then
t.SetActive(true)
if (t.IsVisible.Not) then
t.SetVisible(true)
end
else
t.SetActive(false)
end
end
elseif (theView.GetName = "Bucaramanga_total") then
for each t in theView.GetThemes
if (t.GetName = "Bucaramanga.shp") then
t.SetActive(true)
if (t.IsVisible.Not) then
t.SetVisible(true)
end
else
t.SetActive(false)
end
end
elseif (theView.GetName = "Bucaramanga_Metropolitana") then
for each t in theView.GetThemes
if (t.GetName = "Bucara.shp") then
```

```

        t.SetActive(true)
        if (t.IsVisible.Not) then
            t.SetVisible(true)
        end
    else
        t.SetActive(false)
    end
end
end
end

if ((_diagrama)= nil ) then
    MsgBox.Info("Debe introducir el diagrama de antena deseado","")

else
    for each t in theView.GetActiveThemes
        def = FileName.GetCWD.MakeTmp("nwgrd","") ' Entra aquí
        av.Run("dcell.Dial_TEMS.Adapta.prog1",{t.def,theView})
    end
    av.FindDialog("dcell.Dial_TEMS.Adapta.Fin").Close
end
end

```

dcell.sesion_elegirtipo.okboton.click.ave

'Comprueba que tipo de sesion ha sido elegida y en funcion de esto
'llama a los scripts necesarios o actualiza el valor de _sesion

```

eldialog = av.FindDialog("dcell.sesion.elegirtipo")

pordefecto = eldialog.FindByName("predeterminada")
anterior = eldialog.FindByName("previa")
nueva = eldialog.FindByName("nueva")

if (pordefecto.IsSelected) then
    _sesion = _dirinstal.AsString
elseif (anterior.IsSelected) then
    listasesiones = { }
    nomfich = (_dirinstal+"esri\pfc\sesiones.txt").AsFileName
    antsesion = LineFile.Make(nomfich,#FILE_PERM_READ)
    while (antsesion.IsAtEnd.Not)
        listasesiones.Add(antsesion.ReadElt)
    end
    antsesion.Close
    _sesion = MsgBox.ListAsString(listasesiones,"","Previous sessions")
    if (_sesion = nil ) then
        return nil
    end
    _sesion = _sesion+"\\"
elseif (nueva.IsSelected) then
    _sesion = FileDialog.Put("mysesion".AsFileName,"","SELECT PATH & NAME FOR THE SESSION")
    if (_sesion = nil ) then
        return nil
    end
    _sesion = _sesion.AsString
    listasesiones = { }
    listasesiones.Add(_sesion)
    nomfich = (_dirinstal+"esri\pfc\sesiones.txt").AsFileName
    antsesion = LineFile.Make(nomfich,#FILE_PERM_READ)
    while (antsesion.IsAtEnd.Not)
        unasesion = antsesion.ReadElt
        otrasesion = unasesion+"\datosarcview"
        if ((File.Exists(unasesion.AsFileName))and(File.Exists(otrasesion.AsFileName))) then
            listasesiones.Add(unasesion)
        end
    end
    antsesion.Close
    nomfich = (_dirinstal+"esri\pfc\sesiones.txt").AsFileName
    antsesion = LineFile.Make(nomfich,#FILE_PERM_WRITE)
    num = listasesiones.Count
    for each i in 0..(num-1)
        antsesion.WriteElt(listasesiones.Get(i))
    end
    antsesion.Close

```

```

_sesion = _sesion+"\\"
end
eldialog.Close

if (nueva.IsSelected) then
  av.FindDialog("dcell.sesion.cargarmapas").Open
else
  ' Establezco la vista y el directorio de trabajo
  Mapa_Valencia = av.GetProject.FindDoc("Valencia")
  ' Mapa_Valcen = av.GetProject.FindDoc("Valencia_centro") ' No está activo
  Mapa_Mun = av.GetProject.FindDoc("Munich")
  Mapa_ComuValen = av.GetProject.FindDoc("Comunidad Valenciana")
  Mapa_Madrid = av.GetProject.FindDoc("Madrid")
  Mapa_Bucaramanga = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga") 'modificado Alexys
  Mapa_Bucaramanga_terr = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_terr") 'Modificó Paolo
  Mapa_Bucaramanga_total = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_total") 'Modificó Paolo
  Mapa_Bucaramanga_Metropolitana = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_Metropolitana") 'Modificó Yair

if (anterior.IsSelected) then
  mapasdir = (_sesion+"\datosarcview").AsFileName

  quemapas = mapasdir.Read("*") 'lee en una lista las carpetas que hay en c:\esri\datosarcview\
  num = quemapas.Count
  lista_mapas = {}
  if ((num=0).Not) then
    for each i in 0..(num-1)
      elem = quemapas.Get(i) 'obtiene toda la ruta
      base = elem.GetBaseName 'obtiene solo la carpeta
      lista_mapas.Add(base.AsString)
    end
    lista_mapas.Sort(TRUE)
  end

  abromapa = lista_mapas.Get(0)
else
  abromapa = "valencia"
end

if (abromapa = "comvalen") then
  Mapa_ComuValen.GetWin.Open
  Mapa_ComuValen.GetWin.Activate
  _Nombre_de_Vista = "Comunidad Valenciana"
  _Dir_trabajo = "comvalen"
  _entorno = "rural"
elseif (abromapa = "madrid") then
  Mapa_Madrid.GetWin.Open
  Mapa_Madrid.GetWin.Activate
  _Nombre_de_Vista = "Madrid"
  _Dir_trabajo = "madrid"
  _entorno = "urbano"
elseif (abromapa = "munich") then
  Mapa_Mun.GetWin.Open
  Mapa_Mun.GetWin.Activate
  _Nombre_de_Vista = "Munich"
  _Dir_trabajo = "munich"
  _entorno = "urbano"
elseif (abromapa = "valencia") then
  Mapa_Valencia.GetWin.Open
  Mapa_Valencia.GetWin.Activate
  _Nombre_de_Vista = "Valencia"
  _Dir_trabajo = "valencia"
  _entorno = "urbano"
elseif (abromapa = "valcen") then
  Mapa_Valcen.GetWin.Open
  Mapa_Valcen.GetWin.Activate
  _Nombre_de_Vista = "Valencia_centro"
  _Dir_trabajo = "valcen"
  _entorno = "urbano"
elseif (abromapa = "Bucaramanga") then ' Modificado Alexys
  Mapa_Bucaramanga.GetWin.Open
  Mapa_Bucaramanga.GetWin.Activate
  _Nombre_de_Vista = "Bucaramanga"
  _Dir_trabajo = "Bucaramanga"
  _entorno = "urbano"
elseif (abromapa = "Bucaramanga_terr") then ' Modificado Paolo

```

```

Mapa_Bucaramanga_terr.GetWin.Open
Mapa_Bucaramanga_terr.GetWin.Activate
_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_terr"
_Dir_trabajo = "Bucaramanga_terr"
_entorno = "rural"
elseif (abromapa = "Bucaramanga_total") then ' Modificado Paolo
Mapa_Bucaramanga_total.GetWin.Open
Mapa_Bucaramanga_total.GetWin.Activate
_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_total"
_Dir_trabajo = "Bucaramanga_total"
_entorno = "total"
elseif (abromapa = "Bucaramanga_Metropolitana") then ' Modificado Yair
Mapa_Bucaramanga_Metropolitana.GetWin.Open
Mapa_Bucaramanga_Metropolitana.GetWin.Activate
_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_Metropolitana"
_Dir_trabajo = "Bucaramanga_Metropolitana"
_entorno = "metro"
end
end
end

```

dccell.sesion.cargarmapas.close.ave

```

' Establezco la vista y el directorio de trabajo
Mapa_Valencia = av.GetProject.FindDoc("Valencia")
' Mapa_Valcen = av.GetProject.FindDoc("Valencia_centro") 'No está activo
Mapa_Mun = av.GetProject.FindDoc("Munich")
Mapa_ComuValen = av.GetProject.FindDoc("Comunidad Valenciana")
Mapa_Madrid = av.GetProject.FindDoc("Madrid")
Mapa_Bucaramanga = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga")
Mapa_Bucaramanga_terr = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_terr")
Mapa_Bucaramanga_total = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_total")
Mapa_Bucaramanga_Metropolitana = av.GetProject.FindDoc("Bucaramanga_Metropolitana")

```

```

mapasdir = (_sesion+"\datosarcview\").AsFileName

```

```

quemapas = mapasdir.Read(".*")
num = quemapas.Count
lista_mapas = { }
if ((num=0).Not) then
for each i in 0..(num-1)
elem = quemapas.Get(i)
base = elem.GetBaseName
lista_mapas.Add(base.AsString)
end
lista_mapas.Sort(true)
end

```

```

abromapa = lista_mapas.Get(0)
if (abromapa = "comvalen") then
Mapa_ComuValen.GetWin.Open
Mapa_ComuValen.GetWin.Activate
_Nombre_de_Vista = "Comunidad Valenciana"
_Dir_trabajo = "comvalen"
_entorno = "rural"
elseif (abromapa = "madrid") then
Mapa_Madrid.GetWin.Open
Mapa_Madrid.GetWin.Activate
_Nombre_de_Vista = "Madrid"
_Dir_trabajo = "madrid"
_entorno = "urbano"
elseif (abromapa = "munich") then
Mapa_Mun.GetWin.Open
Mapa_Mun.GetWin.Activate
_Nombre_de_Vista = "Munich"
_Dir_trabajo = "munich"
_entorno = "urbano"
elseif (abromapa = "valencia") then
Mapa_Valencia.GetWin.Open
Mapa_Valencia.GetWin.Activate
_Nombre_de_Vista = "Valencia"
_Dir_trabajo = "valencia"
_entorno = "urbano"
'elseif (abromapa = "valcen") then 'No esta activo

```

```

' Mapa_Valcen.GetWin.Open
' Mapa_Valcen.GetWin.Activate
' _Nombre_de_Vista = "Valencia_centro"
' _Dir_trabajo = "valcen"
' _entorno = "urbano"
elseif (abromapa = "Bucaramanga") then
Mapa_Bucaramanga.GetWin.Open
Mapa_Bucaramanga.GetWin.Activate
_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga"
_Dir_trabajo = "Bucaramanga"
_entorno = "urbano"
elseif (abromapa = "Bucaramanga_terr") then
Mapa_Bucaramanga_terr.GetWin.Open
Mapa_Bucaramanga_terr.GetWin.Activate
_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_terr"
_Dir_trabajo = "Bucaramanga_terr"
_entorno = "rural"
elseif (abromapa = "Bucaramanga_total") then
Mapa_Bucaramanga_total.GetWin.Open
Mapa_Bucaramanga_total.GetWin.Activate
_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_total"
_Dir_trabajo = "Bucaramanga_total"
_entorno = "total"
elseif (abromapa = "Bucaramanga_Metropolitana") then
Mapa_Bucaramanga_Metropolitana.GetWin.Open
Mapa_Bucaramanga_Metropolitana.GetWin.Activate
_Nombre_de_Vista = "Bucaramanga_Metropolitana"
_Dir_trabajo = "Bucaramanga_Metropolitana"
_entorno = "metro"
end

```

ANEXO B

RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE MEDIDAS Y SIMULACIONES

Tabla B.1 Resultados Campaña de Medidas Barrio Bucaramanga para el sistema TDMA.

PROMEDIO DE LAS MEDICIONES POR PUNTO			
Fecha:	21/06/2002	Barrio:	Bucaramanga
Precisión GPS	6 a 8m	Condición:	Soleado y Lluvia
Posición BS:	7° 5,126' N 73° 7,000' WO	Ubicación en el Perfil:	Segunda colina a lo largo del perfil
		Equipo de medición:	Rohde & Schwarz Miniport Receiver EB200
Frecuencia CCA:	880,11MHz	Antena BS:	855DDH90E Decibel Products
dB µV/m	dB µV	Medición (dBm CAL).	Simulación con el Modelo de propagación Andino-UIS (dBm)
Ruta 1			
60,2	35,4	-78,9141	-78,53405
56,8	36,2	-82,3141	-94,763016
66,5	41,6	-72,6141	-72,573723
64,7	38,2	-74,4141	-79,000572
70,8	45,8	-68,3141	-78,954025
60,6	35,4	-78,5141	-91,253426
60,7	35,5	-78,4141	-78,685089
61,4	36,7	-77,7141	-79,909515
64	40	-75,1141	-80,17511
67,2	42,4	-71,9141	-80,043343
59,2	34,2	-79,9141	-81,627518
61,5	35	-77,6141	-77,527878
59,2	32,3	-79,9141	-80,604919
65,1	40,2	-74,0141	-80,576111
68,5	43,6	-70,6141	-74,354965
Ruta 2			
77,2	51,6	-61,9141	-75,03833
79,4	54,3	-59,7141	-84,473877

81,2	56,4	-57,9141	-76,156563
79,9	55,5	-59,2141	-77,144333
82,7	57,8	-56,4141	-77,111542
79,4	54,5	-59,7141	-68,92868
80,9	56	-58,2141	-77,066573
81,2	55,9	-57,9141	-72,221985
76,4	51,2	-62,7141	-85,197899
71,6	46,4	-67,5141	-74,3396
75,5	50,4	-63,6141	-83,78537
73,7	48,4	-65,4141	-72,124779
65,7	40,8	-73,4141	-76,894142
58,4	30,2	-80,7141	-85,008926
70,9	45,6	-68,2141	-72,70166
Ruta 3			
60,4	35,2	-78,7141	-78,736572
60,8	35,6	-78,3141	-69,462852
72,6	47,7	-66,5141	-67,761902
66,5	41,5	-72,6141	-76,220001
69,7	44,6	-69,4141	-73,35895
70,2	45,5	-68,9141	-76,116554
66,5	41,8	-72,6141	-76,09639
70,2	45,2	-68,9141	-76,039108
62,5	37,8	-76,6141	-75,988327
63,9	38,7	-75,2141	-73,723755
67,5	42,7	-71,6141	-76,547585
65	40,8	-74,1141	-76,299789
74,1	48,8	-65,0141	-76,25177
72,6	47,6	-66,5141	-80,706543
74,3	49,6	-64,8141	-99,84137
75,4	50,7	-63,7141	-76,11673
61,8	36,4	-77,3141	-76,54169
69,4	44,4	-69,7141	-68,937515
73,3	48,4	-65,8141	-69,47437
Ruta 4			
69,2	44	-69,9141	-75,90065
62,9	37,5	-76,2141	-75,87854
63,2	38,1	-75,9141	-72,708954
66,4	40,1	-72,7141	-66,270119
62,5	37,8	-76,6141	-68,554756
56,7	32,3	-82,4141	-68,045975
57,3	32,5	-81,8141	-67,299377
63,4	38,5	-75,7141	-67,2061
70,5	45,4	-68,6141	-74,253296
71,2	46,2	-67,9141	-67,02739
64,5	39,5	-74,6141	-66,730911
75,4	50,5	-63,7141	-67,626709
75,5	50,1	-63,6141	-81,720978

75,6	50,7	-63,5141	-67,552475
70,3	45,5	-68,8141	-71,167847
56,1	30,1	-83,0141	-74,939743
67,1	42,4	-72,0141	-71,100464
72,2	47,3	-66,9141	-69,651939
69,4	44,4	-69,7141	-75,443001
68,5	41,1	-70,6141	-74,124176
70,1	45,8	-69,0141	-84,501747
70,2	45,5	-68,9141	-87,936058
77,5	52,4	-61,6141	-83,65044
61,6	36,3	-77,5141	-94,151428
72,9	48,4	-66,2141	-74,171204

Tabla B.2 Resultados Campaña de Medidas Barrio Bucaramanga para el sistema CDMA.

PROMEDIO DE LAS MEDICIONES POR PUNTO			
Fecha:	03/05/2004	Barrio:	Bucaramanga
Precisión GPS	6 a 8m	Condición:	Soleado
Posición BS:	7° 5,126' N 73° 7,000' WO	Ubicación en el Perfil:	Segunda colina a lo largo del perfil
		Equipo de medición:	Sistema Integrado TCI MinCom
Frecuencia CCA:	881,525MHz	Antena BS:	DB874G90R
	dBm CAL. Formula CDMA	Simulación modelo Andino UIS (dBm)	
dB μV/m	TCI		
Ruta 1			
68,934021	-70,19319812	-69,0875	
73,88163757	-65,24558154	-68,7277	
74,57341003	-64,55380908	-59,266	
67,22863007	-71,89858905	-60,4783	
79,28956604	-59,83765307	-59,4221	
82,34043884	-56,78678027	-58,9113	

84,40730286	-54,71991626	-70,2349
91,06711578	-48,06010333	-66,5995
89,21195221	-49,9152669	-67,921
90,87512207	-48,25209704	-57,85
89,80387115	-49,32334796	-67,4073
92,24772644	-46,87949267	-67,373
87,77173615	-51,35548297	-65,642
92,59716797	-46,53005114	-65,6002
92,11692047	-47,01029864	-66,972
92,46313477	-46,66408435	-66,974
92,86086273	-46,26635638	-57,5315
92,89250946	-46,23470965	-60,094
93,99305725	-45,13416186	-64,221
92,59757233	-46,52964679	-60,01

Tabla B.3 Resultados Campaña de Medidas Barrio Provenza para el sistema TDMA.

PROMEDIO DE LAS MEDICIONES POR PUNTO			
Fecha:	21/06/2002	Barrio:	Provenza
Precisión GPS	6 a 8m	Condición:	Soleado
Posición BS:	7° 5,126' N 73° 7,000' WO	Ubicación en el Perfil:	Terreno plano donde se encuentra la Estación Base
		Equipo de medición:	Rohde & Schwarz Miniport Receiver EB200
Frecuencia CCA:	880,11MHz	Antena BS:	855DDH90E Decibel Products
dB µV/m	dB µV	Medición (dBm CAL).	Simulación con el Modelo de propagación Andino-UIS (dBm)
Ruta 1			
86,2	60,1	-52,9141	-60,881
86,8	61,7	-52,3141	-61,37154
88,7	64,2	-50,4141	-56,065
81,2	56,7	-57,9141	-55,81702
74,4	49,3	-64,7141	-49,395
80,1	54,3	-59,0141	-33,66771
92,9	68	-46,2141	-34,814457

96,1	71,3	-43,0141	-35,41892
89,4	64,5	-49,7141	-47,62
92,2	67,2	-46,9141	-30,69978
82,8	57,3	-56,3141	-22,62308
88	63,2	-51,1141	-38,90679
83,6	58,7	-55,5141	-28,232021
94	68,7	-45,1141	-29,7044
82	59	-57,1141	-37,0621
86,1	60,3	-53,0141	-42,1818
85,2	60,8	-53,9141	-38,773
74,9	49,2	-64,2141	-42,906
80,1	55,2	-59,0141	-48,0002
75,7	53,7	-63,4141	-39,4343
80,1	55,5	-59,0141	-46,819067
86,4	61,4	-52,7141	-38,439987
77,7	52,4	-61,4141	-54,430298
81,9	55,9	-57,2141	-57,118488
72,7	46,5	-66,4141	-58,571022
79,9	54,5	-59,2141	-50,883026
79,7	53,6	-59,4141	-59,856384
77	52	-62,1141	-51,384224
72,9	44,5	-66,2141	-59,769913
75,6	51,3	-63,5141	-59,884727
80,5	55,9	-58,6141	-59,8847
Ruta 2			
75,2	50	-63,9141	-60,5984
80,7	55,9	-58,4141	-59,721
78,9	53,6	-60,2141	-60,71648
78,7	53,7	-60,4141	-58,2642
74,3	48,2	-64,8141	-57,0187
79,3	54,2	-59,8141	-55,1598
80,5	55,4	-58,6141	-53,0878
80,7	55,6	-58,4141	-68,498
83,4	58,2	-55,7141	-55,35
81,6	56,7	-57,5141	-50,232
82	56,9	-57,1141	-49,934
86,7	61,7	-52,4141	-44,165
97,7	72,9	-41,4141	-48,3189
96,7	71,7	-42,4141	-49,4035
91	65,9	-48,1141	-50,8961
94	69,5	-45,1141	-44,3008
93	68,1	-46,1141	-43,5646
90,8	66,9	-48,3141	-51,147
75,3	49,6	-63,8141	-54,5131
80,5	55,5	-58,6141	-65,1658
83,5	56,7	-55,6141	-64,184

72,3	47,5	-66,8141	-63,637
75,4	50,3	-63,7141	-61,9314
75,2	50,7	-63,9141	-61,2345
72,9	46,5	-66,2141	-59,8721
74,2	49,1	-64,9141	-57,9218
65,2	40,7	-73,9141	-56,676
56,5	31,2	-82,6141	-72,339601
70,3	45,5	-68,8141	-66,4043
Ruta 3			
90,7	64,1	-48,4141	-49,574
84,2	58,7	-54,9141	-51,478
76,7	52,1	-62,4141	-51,3457
76,7	51,8	-62,4141	-51,3457
83,6	58,5	-55,5141	-49,936
80,9	56,7	-58,2141	-49,9606
82,8	57,7	-56,3141	-46,138
84,2	58,4	-54,9141	-46,724
83,4	59,2	-55,7141	-46,625
80,5	54,5	-58,6141	-46,8305
74,3	50,1	-64,8141	-49,6331
82,4	57,3	-56,7141	-49,5804
87,3	62,8	-51,8141	-45,868
94,2	59,3	-44,9141	-46,131
94	69,1	-45,1141	-46,355
92,4	67,4	-46,7141	-49,2118
90,4	75,7	-48,7141	-46,2994
85,7	60,1	-53,4141	-50,521614
85,4	60,6	-53,7141	-49,793358
90,1	64,9	-49,0141	-50,883297
89,4	64,3	-49,7141	-49,460175
91,3	66,3	-47,8141	-49,01862
92,4	67,3	-46,7141	-44,78208
93,3	68,5	-45,8141	-43,230087
93,2	68,3	-45,9141	-48,697
72,3	46,4	-66,8141	-49,6211
69,9	45,7	-69,2141	-50,958
74,7	50,7	-64,4141	-51,26209

Tabla B.4. Resultados Campaña de Medidas Barrio Provenza para el sistema CDMA.

PROMEDIO DE LAS MEDICIONES POR PUNTO			
Fecha:	21/06/2002	Barrio:	Provenza
Precisión GPS	6 a 8m	Condición:	Soleado
Posición BS:	7° 5,126' N 73° 7,000' WO	Ubicación en el Perfil:	Terreno plano donde se encuentra la Estación Base
		Equipo de medición:	Sistema Integrado TCI MinCom
Frecuencia CCA:	881,525 MHz	Antena BS:	DB874G90R
Simulación con modelo AndinoUIS			
dB μV/m	dBm CAL. Formula CDMA		
Ruta 1			
99,79736328	-39,32985583	-33,59106	
106,6953278	-32,43189135	-36,631	
108,0420609	-31,08515826	-39,2403	
106,8370819	-32,2901372	-45,0071	
107,3385696	-31,78864947	-46,07005	
102,283287	-36,84393206	-48,5832	
92,7787323	-46,34848681	-48,1231	
92,89807129	-46,22914782	-51,1163	
91,50262451	-47,6245946	-52,4683	
92,23503113	-46,89218799	-51,9056	
95,73487091	-43,3923482	-41,3665	
99,9226532	-39,20456591	-37,0576	
102,5556564	-36,57156268	-35,37042	
102,3354034	-36,79181567	-50,79612	
96,2465744	-42,88064471	-57,7902	
88,63938141	-50,4878377	-60,4288	
92,60807037	-46,51914874	-62,6161	
91,55789185	-47,56932727	-67,4347	
92,32740021	-46,79981891	-68,7324	
97,72743225	-41,39978686	-69,4071	

Ruta 2		
80,30290222	-58,82431689	-74,132
74,10435486	-65,02286425	-74,375
77,45030212	-61,67691699	-74,8279
76,24280548	-62,88441363	-75,1338
73,38864898	-65,73857013	-74,3506
76,0280075	-63,09921161	-75,3196
75,586586	-63,54063311	-73,1189
71,81307983	-67,31413928	-75,7443
73,15756988	-65,96964923	-75,869
74,92243957	-64,20477954	-76,1846
69,97077942	-69,15643969	-69,847
73,7270813	-65,40013781	-70,651
73,07520294	-66,05201617	-70,6227
78,39528656	-60,73193255	-75,59005
72,81245422	-66,31476489	-74,6052
79,95596313	-59,17125598	-80,046
71,48433685	-67,64288226	-73,184
72,35251617	-66,77470294	-77,2851
76,20633697	-62,92088214	-77,616
75,97501373	-63,15220538	-77,804

Tabla B.5 Resultados Campaña de Medidas Barrio San Luís para el sistema TDMA.

PROMEDIO DE LAS MEDICIONES POR PUNTO			
Fecha:	21/06/2002	Barrio:	San Luis
Precisión GPS	6 a 8m	Condición:	Soleado
Posición BS:	7° 5,126' N 73° 7,000' WO	Ubicación en el Perfil:	Cañon. Puntos equidistantes de la BS.
		Equipo de medición:	Rohde & Schwarz Miniport Receiver EB200
Frecuencia CCA:	880,11MHz	Antena BS:	855DDH90E Decibel Products
dB μV/m	Medición (dBm CAL)	Simulación con el Modelo de propagación Andino-UIS (dBm)	

Ruta 1		
83,68	-55,4341	-67,22
77,615	-61,4991	-63,93
70,32	-68,7941	-67,237
74,643	-64,4716	-66,487
72,188	-66,9266	-66,852
76,47	-62,6441	-75,493
70,193	-68,9216	-70,067
72,415	-66,6991	-64,361
71,075	-68,0391	-66,273
74,333	-64,7816	-64,544
73,258	-65,8566	-66,4789
75,17	-63,9441	-66,187
79,928	-59,1866	-75,83
67,435	-71,6791	-75,926
69,13	-69,9841	-75,9105
68,53	-70,5841	-75,974
81,585	-57,5291	-75,995
70,425	-68,6891	-76,079
69,485	-69,6291	-76,054
72,76	-66,3541	-76,066
79,454	-59,6602	-64,434
75,111	-64,0033	-65,417
Ruta 2		
65,8	-73,3141	-79,03
67,23	-71,8841	-82,708
64,76	-74,3541	-65,3778
74,19	-64,9241	-63,651
72,55	-66,5641	-65,3734
74,35	-64,7641	-67,2695
76,54	-62,5741	-78,85608
73,87	-65,2441	-65,842
74,8	-64,3141	-75,5375
74,73	-64,3841	-66,099
80,26	-58,8541	-75,53
76,58	-62,5341	-69,688
78,19	-60,9241	-75,508
76,89	-62,2241	-75,516
73,12	-65,9941	-75,501
77,23	-61,8841	-70,067
71,66	-67,4541	-64,416
75,97	-63,1441	-66,27
80,75	-58,3641	-61,523
77,88	-61,2341	-75,98

**Tabla B.6 Resultados Campaña de Medidas Barrio San Luís para el sistema
CDMA.**

PROMEDIO DE LAS MEDICIONES POR PUNTO			
Fecha:	26/04/2004	Barrio:	San Luis
Precisión GPS	6 a 8m	Condición:	Soleado
Posición BS:	7° 5,126' N 73° 7,000' WO	Ubicación en el Perfil:	Cañon. Puntos equidistantes de la BS.
		Equipo de medición:	Sistema Integrado TCI MinCom
Frecuencia CCA:	881,525 MHz	Antena BS:	DB874G90R
dB µV/m	Mediciones (dBm CAL). Formula CDMA	Simulaciones modelo Andino UIS (dBm)	
Ruta 1			
80,43360138	-58,69361773	-66,741	
75,3398056	-63,78741351	-63,5661	
71,42369843	-67,70352069	-65,8496	
72,31929779	-66,80792132	-66,4325	
74,95239258	-64,17482653	-65,92	
76,68576813	-62,44145099	-65,912	
72,32239532	-66,80482379	-65,9007	
75,89280701	-63,23441211	-65,5612	
77,01141357	-62,11580554	-63,083	
77,85431671	-61,2729024	-64,771	
75,07262421	-64,05459491	-64,759	
74,86936188	-64,25785724	-64,3703	
75,46321879	-63,66400032	-64,3604	
Ruta 2			
77,66174316	-61,46547595	-54,3323	
80,68877411	-58,438445	-54,6773	
84,10697174	-55,02024737	-53,8035	
88,38776398	-50,73945514	-53,4935	
86,88486481	-52,24235431	-53,3147	
80,23696136	-58,89025775	-53,7826	
80,72795105	-58,39926806	-58,06023	

76,45890808	-62,66831103	-60,6335
84,95615387	-54,17106524	-66,3008
82,66963196	-56,45758716	-63,7182
81,48787689	-57,63934222	-55,7351
82,83653259	-56,29068652	-63,647
80,56025957	-58,56695955	-53,461

Tabla B.7 Muestra de resultados de mediciones hechas en convergencias de los barrios Diamante II y Provenza.

Puntos en Diamante II y Provenza			
dBuV/m	dBm	Simulación	Diferencia
91,07804	-48,03027	-61,093	13,06273
84,76829	-54,34	-62,45	8,11
94,27804	-44,83026	-59,917	15,08674
88,7	-50,4083	-58,4262	8,0179
81	-58,1083	-59,9552	1,8469
93,96923	-45,139	-66,7168	21,5778
84,41951	-54,6887	-68,4978	13,8091
70,1129	-68,995	-46,1426	22,8524
72,54	-66,5683	-35,659	30,9093
73,154	-65,9543	-49,4654	16,4889
73,45	-65,6583	-43,6073	22,051
68,25	-70,8583	-72,6144	1,7561
60,73	-78,3783	-78,7737	0,3954
77,15	-61,9583	-58,5833	3,375
71,845	-67,2633	-48,916	18,3473
72,3793	-66,729	-44,631	22,098
67,3125	-71,7958	-79,81	8,0142
77,4	-61,7083	-41,09	20,6183
81,4117	-57,6966	-55,54	2,1566
74,35	-64,7583	-47,08	17,6783
74,58	-64,5283	-50,1979	14,3304
69,255	-69,8533	-63,93	5,9233
68,3	-70,8083	-72,1844	1,3761
92,35	-46,7583	-56,9267	10,1684
104,7548	-34,3535	-43,9975	9,644

ANEXO C

CODIGOS DEL ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN ANDINO UIS®

Se presenta dos programas, sin embargo adicional a estos se encuentran otros.

C.1 PROGRAMA PRINCIPAL

```
/******  
/* MODELO DE PROPAGACION ANDINO-UIS *****  
/******  
/* VERSIÓN PARA ARCVIEW 3.1 *****  
/******  
/* YAIR IVAN CARREÑO LIZARAZO */  
/* UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER */  
/* ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES */  
/* BUCARAMANGA-COLOMBIA NOVIEMBRE 2004 */  
/* RadioGIS - 2004 */  
/******  
/* TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS - YAIR IVAN CARREÑO LIZARAZO – 2004 */  
/******  
  
#include <stdio.h>  
#include <stdlib.h>  
#include <math.h>  
#include <string.h>  
  
#define PI fabs(acos(-1.)) /* Constante PI */  
#define Re 8.5e6 /* Radio Efectivo de la Tierra (m) */  
  
float ganancia[360][90]; /* Arreglo para almacenamiento del diagrama de radiacion */  
  
/* Diagrama de la antena transmisora */  
float diag_tx (float R,float H,int dx,int dy,int diagrama,int correc_theta,int correc_azimut);  
/* Función para el cálculo con línea de vista */  
float two_ray (float lambda,float R,float ht,float hr,float Gt_direct,float Gt_refle);  
/* Función para calcular el eutd */  
float ter_eutd (float lambda,float R,float ori,float w);  
/******  
/****** MAIN *****  
/******  
main (int argc,char *argv[]) {  
/******  
/* Punteros de los ficheros utilizados */  
/******  
FILE *fdatos; /*Para lectura de parametros de entrada */  
FILE *fdiagrama; /*Para lectura del diagrama de radiación */  
FILE *gridf; /*Para lectura del mapa digital */  
FILE *resultados; /*Para escritura de los resultados de propagacion */  
/******  
/* Variables auxiliares */  
/******  
  
int i,j; /* Para lo ciclos */  
int azimut_i,theta_i; /* Para cargar el diagrama de radiación */  
int fr,cr,frac,craux; /* Fila y columna del rx */  
long int prod,ind,idr,ind2; /* Para almacenamiento del tamaño de las matrices */  
float *mapa,*campo; /* Punteros para almacenar los grids de entrada y salida */  
char *tira; /* Para copiar la cabecera de los archivos */  
float temp; /* Para la conversión de las matrices en vectores */
```

```

float dx,dy; /* Para la creación de los vectores X y Y */
int e1; /* Tamaño de la celda */
float e; /* Variable para la distancia tx-rx en numero de celdas */
int *x,*y,*vec1; /* Punteros para los vectores de posición del perfil */
float paso,aux; /* Variables para la creación de los vectores X y Y */
float *perfil; /* Puntero para el almacenamiento de los perfiles */
/*****/
/* Variables para el cálculo del promedio de alturas de edificios y terreno */
/*****/
int posiciontx,fin,j_ini,n_nocero;
float hmax,hmin,hmed,H,hu; /* Alturas máxima, mínima, promedio, offset de Tx y última altura del perfil general */
int this_i,next_i,ultimo_edif; /* Variables para el cálculo de la distancia media entre edificios */
float d,Href; /* Distancia media entre edificios y altura del terreno de referencia */
double tan,beta; /* Orientación del perfil */
int cuad_x,cuad_y; /* Orientación de la vía */
float raux;
float Gt_direc,Gt_refle;
/*****/
/* Variables de los parámetro de entrada */
/*****/
float pire; /* Potencia Isotropica Irradiada Efectiva */
float Grx; /* Ganancia del receptor en dB */
float frecuencia; /* Frecuencia del transmisor en MHz */
float ht,hr; /* Alturas de tx, rx y alturas auxiliares para último y penultimo edificio */
int nfiles,ncols; /* Número de filas y columnas del grid */
int ft,ct; /* Fila y columna donde se encuentra el tx */
float celda; /* Lado de la celda en metros */
int diagrama; /* Verificación de existencia en disco del diagrama de radiación */
int correc_azimut,correc_theta; /* Angulos de direccionamiento de la antena Tx */
char diag[80]; /* Dirección en disco del diagrama de radiación */
/*****/
/* Variables utilizadas como datos de los calculos finales */
/*****/
float R,w; /* Distancia tx-rx (en m) */
int n_edif; /* Número de edificios en el perfil */
float lambda; /* Para la longitud de onda y ángulo de incidencia del rayo */
float Gt; /* Ganancia de la antena transmisora (dB) */
/*****/
/* Variables para identificar orientación */
/*****/
int k=1,k1=1,count=0,countax=0,countay=0,countaz=0,flag=0,p=0;
int *xc,*yc,*pdaa;
int m,n,mx,coorx1,coorx2,coory1,coory2,coory3,coorx3;
float pda,dyc,dxc,dxco,dyco;
long int indd,inda;
double ori;
/*****/
/* Variables para los resultados de los calculos finales */
/*****/
float Lo,L,Lb,Lori,Lrts,Lmsd,Lbsh,Dhmovil,ka,kd,kf,andino;
/*****/
/* Lectura de los archivos de entrada */
/*****/
if ( argc!=4 ) {
printf("Error en la entrada de argumentos.\n");
printf("La forma de invocar al programa debe ser:\n");

```

```

printf("wb <ciudad> <fresult> <fdatos> \n");
exit(1);
}
/* Obtencion de los parametros del fichero de datos */
if ((fdatos=fopen(argv[3],"r")) != NULL){
    fscanf(fdatos,"%f",&pire);
    fscanf(fdatos,"%f",&Grx);
    fscanf(fdatos,"%f",&frecuencia);
    fscanf(fdatos,"%f",&ht);
    fscanf(fdatos,"%f",&hr);
    fscanf(fdatos,"%d",&nfiles);
    fscanf(fdatos,"%d",&ncols);
    fscanf(fdatos,"%d",&ft);
    fscanf(fdatos,"%d",&ct);
    fscanf(fdatos,"%f",&celda);
    fscanf(fdatos,"%d",&diagrama);
    fscanf(fdatos,"%s",&diag);
    fscanf(fdatos,"%d",&correc_azimut); /* Angulo de máxima potencia con respecto al Norte del mapa */
    fscanf(fdatos,"%d",&correc_theta); /* Inclinación vertical de la antena respecto al plano X-Y */
}
else {
    printf("No puedo abrir el fichero de datos\n");
    exit(1);
}
fclose(fdatos);
/* Si hace falta carga en memoria el diagrama de la antena transmisora */
if (diagrama==3)
{
    if ((fdiagrama = fopen(diag,"r")) == NULL)
    {
        printf("\nERROR- No se encuentra el fichero diagrama.\n");
    }
    else
    {
        for (azimut_i=0; azimut_i<360; azimut_i++)
            for (theta_i=0; theta_i<90; theta_i++)
                fscanf(fdiagrama, "%f",&(ganancia[azimut_i][theta_i]));
        fclose(fdiagrama);
    }
}
/* Longitud de onda (m), la frecuencia en MHz */
lambda=300/frecuencia;
/* Reserva de memoria para el mapa digital y los resultados */
prod=(long) nfiles*ncols;
mapa=(float *)calloc(prod,sizeof(float));
campo=(float *)calloc(prod,sizeof(float));
if (!mapa || !campo) {
    printf("No queda memoria disponible para ciudad, campo \n");
    exit(1);
};
/* Operaciones con los grids de entrada (Matrices a Vectores) */
if ((gridf=fopen(argv[1], "r")) != NULL) /* Abre el grid de alturas de edificios + terreno para
lectura */
{
    if ((resultados=fopen(argv[2],"w")) != NULL) /* Abre el fichero de campo para escritura */
    {
        tira=(char *) calloc(80,sizeof(char)); /* Reserva de memoria para la tira de caracteres
*/
        for(i=1;i<=6;i++)
        {
            fscanf(gridf,"%s\n",tira); /* Copia la cabecera del fichero de alturas de
edificios */
            fprintf(resultados,"%s ",tira); /* La escribe en el fichero de campo */
            fscanf(gridf,"%s\n",tira);
            fprintf(resultados,"%s\n",tira);
        };
    }
}

```



```

x= (int *) calloc(e1,sizeof(int)); /* En x[] se guardan las columnas y en y[] las filas */
y= (int *) calloc(e1,sizeof(int)); /* del grid que determina los puntos pertenecientes al
perfil */
if (!x || !y) {
    printf("No queda memoria disponible para coordenadas \n");exit(1);
}
/* Creacion del vector x */
paso=(e==0) ? 0 : dx/floor(e);          /* Para definir la cantidad de avance
*/
for(i=0;i<(e1-1);i++)                  /* Como referencia se toma a Tx
*/
{
    aux=ct+i*paso-floor(ct+i*paso);/* Para la corrección diagonal debido a celdas
cuadradas */
    if(aux<0.5)
    {
        x[i]=floor(ct+i*paso);          /* Asigna una posición no mayor
*/
    }
    else
    {
        x[i]=ceil(ct+i*paso);          /* Asigna una posición no menor
*/
    }
}
x[e1-1]=cr;                            /* El último
punto no se interpola, al igual que el primero */
/* Creacion del vector y */
paso=(e==0) ? 0 : dy/floor(e);          /* Igual que el vector x
*/
for(i=0;i<(e1-1);i++)
{
    aux=ft+i*paso-floor(ft+i*paso);
    if(aux<0.5)
    {
        y[i]=floor(ft+i*paso);
    }
    else
    {
        y[i]=ceil(ft+i*paso);
    }
}
y[e1-1]=fr;
/*****
/* Se halla el perfil de obstáculos del mapa digital (Referenciado a la altura del Receptor) */
/*****
perfil=(float *) calloc(e1,sizeof(float));
if (!perfil){
    printf("No queda memoria disponible para el perfil de edificios \n");
    exit(1);
}
idr=(long)ncols*y[e1-1]+x[e1-1];
Href=mapa[idr];          /* Altura de la posición del Receptor */
for(j=0;j<(e1-1);j++)
{
    ind2 = (long) ncols*y[j]+x[j];      /* La manera de leer una matriz en forma de
vector */
    perfil[j]=mapa[ind2]-Href;          /* Alturas referenciadas con respecto a la del
receptor */
}
perfil[e1-1] = Href+hr;                /* Se incluye la altura del receptor
*/
free(x);
free(y);          /* Liberación de memoria para los punteros X,Y */
/*****
/*
Parámetros del Modelo Andino -UIS */

```

```

/*****
/* Se determina si el tx esta en la calle o en un obstáculo */
if (perfil[0]>0) posiciontx=1; /* obstáculo */
else posiciontx=0; /* Calle */
/* Se almacenará en vec1 los indices del perfil en los que hay obstáculos,si el tx */
/* está en un edificio, este edificio no cuenta como obstáculo */
vec1= (int *) calloc(e1,sizeof(int));
if (!vec1){
    printf("No queda memoria disponible para vec1\n");
    exit(1);
}
j_ini=0;
fin=0;
if (posiciontx==1){
    do { /* avanza el índice j_ini hasta llegar al primer
obstáculo */
        j_ini = j_ini+1;
        if (perfil[j_ini]<=0) fin=1;
    }
    while ((fin==0) || (j_ini<(e1-1)));
}
/*****
/* Calcula la altura promedio de los obstáculos */
/*****
hmed=hu=0;
for(j=j_ini,n_nocero=0;j<e1;j++)
{
    if (perfil[j]>0)
    {
        if (n_nocero==0) hmax=hmin=perfil[j];
        vec1[n_nocero++]=j ;
        hmed+=perfil[j];
        hu=perfil[j];
        if (hu<hmin) hmin=hu;
        if (hmax<hu) hmax=hu;
    }
}
if (n_nocero==0) goto linea_de_vista; /* ht = hbase */
else hmed=hmed/n_nocero; /* hmed = hroof */
H=ht-hmed; /* H = delta hbase */
/*****
/* Calcula la distancia promedio entre los obstáculos */
/*****
d=0;
n_edif=ultimo_edif=0;
for(j=0;j<(n_nocero-1);j++)
{
    this_i=vec1[j];
    next_i=vec1[j+1];
    if(perfil[this_i]>perfil[next_i])
    {
        n_edif+=1;
        if (ultimo_edif!=0) d+=(this_i-ultimo_edif)*R/floor(e);
        ultimo_edif=this_i;
    }
    else if ((next_i-this_i)>1)
    {
        n_edif+=1;
        if (ultimo_edif!=0) d+=(this_i-ultimo_edif)*R/floor(e);
        ultimo_edif=this_i;
    }
}
if (ultimo_edif!=0) d+=(vec1[n_nocero-1]-ultimo_edif)*R/floor(e);
d=(n_edif>0) ? d/n_edif : 0;
w=10;
/*****

```

```

/* Identificación y cálculo de vías y convergencias */
/*****
/* Reserva de memoria para los vectores */
xc = (int *) calloc(350,sizeof(int));
yc = (int *) calloc(350,sizeof(int));
pdaa = (int *) calloc(350,sizeof(int));
if (!xc || !yc || !pdaa) {
    printf("No queda memoria disponible para coordenadas \n");
    exit(1);
}
/* Coordenadas de la espiral */
for (m=1;m<18;m++){
    if ((m%2)==0){
        mx = 1;
    }
    else{
        mx = -1;
    }
    for (n=1;n<=(2*m);n++){
        if (n<=m){
            xc[k]= fraux + mx;
            yc[k]= fraux;
            fraux=xc[k];
        }
        else{
            yc[k]=fraux + mx;
            xc[k]=fraux;
            fraux=yc[k];
        }
        k = k+1;

        if (k>=300){
            break;
        }
    }
}
/* Identificación del entorno */
for (i=1;i<=6;i++){
    for (j=1;j<=((8*i)+1);j++){
        indd = (long) ncols * yc[k1+1] + xc[k1+1];
        inda = (long) ncols * yc[k1] + xc[k1];
        if ((indd<0)||((inda<0)){
            ori=0;
            goto salte;
        }
        if ((indd>(ncols*nfiles))||((inda>(ncols*nfiles))){
            ori=0;
            goto salte;
        }
        else {
            pda = mapa[indd]-mapa[inda];

pdaa[k1] = abs((int)pda);

            if (pdaa[k1]>=1){
                count = count + 1;

                countay = countay + 1;
                countaz = countaz + 1;
                if (countay==1){
                    coory1 = yc[k1+1];
                    coorx1 = xc[k1+1];
                }
                if (countay==2){
                    coory2 = yc[k1];
                    coorx2 = xc[k1];
                }
                if (countaz==4){
                    coory3 = yc[k1];

```

```

                                coorx3 = xc[k1];
                                }
                                }
                                }
                                k1=k1+1;
                                }
                                if (k1>=300)break;
                                if(count>=6){
                                    flag=1;          /* Es una convergencia */
                                    goto sigue;
                                }
                                else{
                                    if(count==4)
                                        countax=count;
                                    count=0;
                                }
                                if ((coory1==coory2)&&(coorx1==coorx2))
                                    countay=0;
                                }
                                if (countax==4){
                                    flag=2;          /* Es una Vía */
                                }
                                else{
                                    flag=3;          /* Es un edificio */
                                }
                                /* Determinación de la orientación */
sigue:
                                if (flag==2){
                                    dyc = coory1-coory2;
                                dxc = coorx2-coorx1;
                                    if (dxc==0){
                                        ori=90;          /* La orientación es 90 grados */
                                    }
                                    else{
                                        ori=atan(dyc/dxc);
                                        ori=(ori*180)/(PI);
                                        if (ori<0) ori=180 + ori;
                                    }
                                }
                                }
                                if (flag==1){
                                    dyco = fabs(coory1-coory3);
                                dxco = fabs(coorx3-coorx1);
                                    if (dxco==0){
                                        ori=90;          /* La orientación es 90 grados */
                                    }
                                    else{
                                        ori=atan(dyco/dxco);
                                        ori=(ori*180)/(PI);
                                        if (ori<0) ori=180 + ori;
                                        if (ori>=90) ori= ori-90;
                                    }
                                }
                                }
                                if (flag==3) ori=0;
salte:
                                free(xc);
                                free(yc);
                                free(pdaa);
                                /******
                                /* Para encontrar el parámetro de orientación del modelo */
                                /******
                                cuad_x=ct-cr;          /* Dependiendo el signo se ubican los
                                cuad_y=ft-fr;
                                if (ori>0)          /* Para saber si no hay definida una vía */

```

```

{
    if ((cuad_y>0)&&(cuad_x<=0))
    {
        ori=abs(beta-ori); /* EL punto receptor está en el primer
cuadrante */
        if (ori>90) ori=180-ori; /* Por si la orientación es mayor de 90° */
    }
    if ((cuad_y>=0)&&(cuad_x>0))
    {
        ori=abs(180-(beta+ori)); /* El punto receptor está en el segundo
cuadrante */
        if (ori>90) ori=180-ori; /* Por si la orientación es mayor de 90° */
    };
    if ((cuad_y<0)&&(cuad_x>=0))
    {
        ori=abs(beta-ori); /* EL punto receptor está en el tercer
cuadrante */
        if (ori>90) ori=180-ori; /* Por si la orientación es mayor de 90° */
    };
    if ((cuad_y<=0)&&(cuad_x<0))
    {
        ori=abs(180-(beta+ori)); /* EL punto receptor está en el cuarto
cuadrante */
        if (ori>90) ori=180-ori; /* Por si la orientación es mayor de 90° */
    };
    if ((cuad_x=0)&&(cuad_y=0)) /* Centro de referencia */
    {
        ori=-1111; /* Para identificar
que el receptor esta sobre Tx */
    };
}
else
{
    ori=-9999; /* Para identificar
que no hay vía */
};
/*****
/* Cálculo del término eutd */
/*****
/* Espacio libre */
Lo=-20*log10(lambda/(4*PI*(R))); /* R y Lambda en (m) */
/* Cálculo de Lori debido a la orientación de las vías */
if (ori!=-9999)
{
    if (flag==2){
        if (ori>=35){
            if(ori<55)
                Lori=2.5+0.075*(ori-35);
            else
                Lori=4-0.114*(ori-55);
        }
        else
            Lori=-10+0.354*ori;
    }
    if (flag==1){
        ori=(ori*PI)/(180);
        andino=ter_eutd(lambda,R,ori,w);
    }
    if (flag==3){
        Lori=0;
        andino=0;
    }
}
else {
    Lori=0;
    andino=0;
}

```

```

    }

    /******
    /*                               */
    /*                               */
    /******

    Dhmovil=(float)fabs(hmed-perfil[e1-1]);
    raux=((e1-1)-vec1[n_nocero-2])*R/floor(e);
    if ((Dhmovil==0)||(raux==0)){
        Lrts=0;
    }
    else{
    Lrts=-8.2-10*log10(2*(raux))+10*log10(frecuencia)+20*log10(Dhmovil)+Lori;
    }
    if (n_edif>0)
    {
        if (H<=0)
        {
            Lbsh=0;
            kd=18 - (15*H/hmed);
            if (R>=500)
                ka = 54 - (0.8*H);
            else
                ka = 54 - (0.8*H*R/500);
        }
        else
        {
            Lbsh=-18*log10(1+H);
            ka=54;
            kd=18;
        }
        kf= -4 + 0.7*((frecuencia/925)-1); /* Ciudades medianas */
        Lmsd=Lbsh+ka+kd*log10(R/1000)+kf*log10(frecuencia)-9*log10(d);
    }
    else
        Lmsd=0;

    /******
    /*                               */
    /*                               */
    /******

diagrama_antena:
    Gt=diag_tx(R,H,dx,dy,diagrama,correc_theta,correc_azimut);
    goto fin_bucle;
    /******
    /*                               */
    /*                               */
    /******

linea_de_vista :
    Gt_direc=diag_tx(R,(ht-perfil[e1-1]),dx,dy,diagrama,correc_theta,correc_azimut);
    Gt_direc=pow(10,Gt_direc/20);
    Gt_refle=diag_tx((ht*R)/(ht+perfil[e1-
1])),ht,dx,dy,diagrama,correc_theta,correc_azimut);
    Gt_refle=pow(10,Gt_refle/20);
    L=Lb=two_ray(lambda,R,ht,perfil[e1-1],Gt_direc,Gt_refle);
    Gt=0;

fin_bucle:

    campo[ind]=Gt+pire+Grx-Lb; /* Potencia recibida en dBm */

}

else {
    campo[ind]= -9999;
}
free(perfil);
free(vec1); /* Liberación de memoria de los perfiles para el siguiente ciclo */
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

```

```

    } /*fin del bucle principal */
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////
/******
/*          Escritura del fichero de potencia en disco          */
/******
if ((resultados=fopen(argv[2],"a")) != NULL)
    {
    for (i=0; i<nfiles; i++)
        {
        for(j=0; j<ncols; j++)
            {
            ind=(long) ncols*i+j;
            if (j==(ncols-1))
                {
                fprintf(resultados,"%f\n",campo[ind]);
                }
            else
                {
                fprintf(resultados,"%f ",campo[ind]);
                }
            }
        }
    fclose(resultados);
    printf("La potencia esta en disco\n");
}
else
    {
    printf("No se puede abrir fichero de salida \n");
    exit(1);
    };
free(campo);
free(mapa);
} /****** Fin main *****/

```

C.2 PROGRAMA AUXILIAR

Éste programa fue creado como apoyo al programa principal. Es básicamente la función que calcula el término *eutd* considerado en las convergencias de las vías.

```

/******
/****** PERDIDAS POR DIFRACCION EN CRUCES *****
/****** Yair Ivan Carreño Lizarazo *****
/****** RadioGIS-UIS *****
/****** 2004 *****
/******
#include <math.h>
#include "micompl.h"

#define PI fabs(acos(-1.))

float ter_eutd (float lambda,float R,float ori,float w) {

int i;
float li;
float coefdif,Longi,numonda,eutd;
float betamas,betamenos,Nmas,Nmenos,amasp,amasn,amenosp,amenosn;
float x1,x2,x3,x4;

```

```

float F1,F2,F3,F4;
float A1,A2,A3,A4;
float fac1,fac2,fac3,fac4;
/*****
/***** Almacenamiento de coeficientes *****/
/*****
float va[12]={+1.595769140,-0.000001702,-6.808568854,-0.000576361,+6.920691902,-0.016898657,-
3.050485660,-0.075752419,+0.850663781,-0.025639041,-0.150230960,+0.034404779};
float vb[12]={-0.000000033,+4.255387524,-0.000092810,-7.780020400,-0.009520895,+5.075161298,-
0.138341947,-1.363729124,-0.403349276,+0.702222016,-0.216195929,+0.019547031};
float vc[12]={+0.000000000,-0.024933975,+0.000003936,+0.005770956,+0.000689892,-
0.009497136,+0.011948809,-0.006748873,+0.000246420,+0.002102967,-0.001217930,+0.000233939};
float vd[12]={+0.199471140,+0.000000023,-0.009351341,+0.000023006,+0.004851466,+0.001903218,-
0.017122914,+0.029064067,-0.027928955,+0.016497308,-0.005598515,+0.000838386};
/*****

fcomplex sumatoria;

Longi=(w*R)/(w+1.414*R);
numonda=(2*PI/lambda);

betamas = (0.75*PI)+ori;
betamenos = (0.75*PI)-ori;
Nmas = ceil((betamas+PI)/(3*PI));
Nmenos = floor((betamenos-PI)/(3*PI));
amasp = 2*pow((cos((3*PI*Nmas-betamas)/2)),2);
amasn = 2*pow((cos((3*PI*Nmas-betamenos)/2)),2);
amenosp = 2*pow((cos((3*PI*Nmenos-betamas)/2)),2);
amenosn = 2*pow((cos((3*PI*Nmenos-betamenos)/2)),2);
x1=numonda*Longi*amasn;
x2=numonda*Longi*amenosn;
x3=numonda*Longi*amenosp;
x4=numonda*Longi*amasp;

/*****
sumatoria=Complex(0,0);
if (x1<4){
    for (i=0;i<12;i++){
        sumatoria = Cadd(sumatoria,RCmul(pow((x1/4),i),Complex(va[i],vb[i])));
        A1=Cabs(sumatoria);
    }
    A1=(1/2)-(sqrt(x1/4)*A1);
}
else {
    for (i=0;i<12;i++){
        sumatoria = Cadd(sumatoria,RCmul(pow((4/x1),i),Complex(vc[i],vd[i])));
        A1=Cabs(sumatoria);
    }
    A1=-((sqrt(4/x1)*A1);
}

/*****
sumatoria=Complex(0,0);
if (x2<4){
    for (i=0;i<12;i++){
        sumatoria = Cadd(sumatoria,RCmul(pow((x2/4),i),Complex(va[i],vb[i])));
        A2=Cabs(sumatoria);
    }
    A2=(1/2)-(sqrt(x2/4)*A1);
}
else {
    for (i=0;i<12;i++){
        sumatoria = Cadd(sumatoria,RCmul(pow((4/x2),i),Complex(vc[i],vd[i])));
        A2=Cabs(sumatoria);
    }
}

```

```

    A2=-sqrt(4/x2)*A2;
}
/*****
sumatoria=Complex(0,0);
if (x3<4){
    for (i=0;i<12;i++){
        sumatoria = Cadd(sumatoria,RCmul(pow((x3/4),i),Complex(va[i],vb[i])));
        A3=Cabs(sumatoria);
    }
    A3=(1/2)-sqrt(x3/4)*A3;
}
else {
    for (i=0;i<12;i++){
        sumatoria = Cadd(sumatoria,RCmul(pow((4/x3),i),Complex(vc[i],vd[i])));
        A3=Cabs(sumatoria);
    }
    A3=-sqrt(4/x3)*A3;
}
/*****
sumatoria=Complex(0,0);
if (x4<4){
    for (i=0;i<12;i++){
        sumatoria = Cadd(sumatoria,RCmul(pow((x4/4),i),Complex(va[i],vb[i])));
        A4=Cabs(sumatoria);
    }
    A4=(1/2)-sqrt(x4/4)*A3;
}
else {
    for (i=0;i<12;i++){
        sumatoria = Cadd(sumatoria,RCmul(pow((4/x4),i),Complex(vc[i],vd[i])));
        A4=Cabs(sumatoria);
    }
    A4=-sqrt(4/x4)*A4;
}
/***** FUNCION F(X) *****/
F1= sqrt(2*PI*x1)*A1;
F2= sqrt(2*PI*x2)*A2;
F3= sqrt(2*PI*x3)*A3;
F4= sqrt(2*PI*x4)*A4;

if (PI+betamenos==0)
    fac1=F1;
else
    fac1=(1/(tan(0.583*PI-(ori/3))))*F1;
if (PI-betamenos==0)
    fac2=F2;
else
    fac2=(1/(tan(0.083*PI+(ori/3))))*F2;
if (PI-betamas==0)
    fac3=F3;
else
    fac3=(1/(tan(0.083*PI-(ori/3))))*F3;
if (PI+betamas==0)
    fac4=F4;
else
    fac4=(1/(tan(0.583*PI+(ori/3))))*F4;

coefdif=-sqrt(lambda)/59.217*(fac1+fac2+fac3+fac4);
li=sqrt(R/(0.707*w+0.5*w));
eutd = (1/R)*li*coefdif;
if (eutd>1000000) eutd=100;
if (eutd<-1000000) eutd=-100;
eutd=20*log10(R*fabs(eutd));
return eutd;
}

```