



**RADIOPROPAGACIÓN EN LAS COMUNICACIONES MÓVILES CON  
TECNOLOGÍA CDMA EN PRESENCIA DE TERRENO ESCARPADO.**

CRISTIAN ALEXIS GARCIA LÓPEZ  
JOSÉ LUIS MELÉNDEZ MORENO

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

**BUCARAMANGA**

**2004**

**RADIOPROPAGACIÓN EN LAS COMUNICACIONES MÓVILES CON  
TECNOLOGÍA CDMA EN PRESENCIA DE TERRENO ESCARPADO.**

CRISTIAN ALEXIS GARCIA LÓPEZ  
JOSÉ LUIS MELÉNDEZ MORENO

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

Director

HOMERO ORTEGA BOADA  
Ph.D Ciencias de la Ingeniería

Co-director

ALEXIS PAOLO GARCÍA ARIZA  
MsC (c) Ingeniero Electrónico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2004**

A Dios, Padre Todo poderoso.

A mi Padre, que desde el cielo ruega por nuestra familia.

A mi Madre y mis hermanos por su paciencia y apoyo incondicional durante  
Todo este proceso.

***Cristian Alexis Garcia López***

A Dios, por ser guía y luz en mi vida.

A mis padres, a quienes les debo lo que soy.

A mis hermanos por todo su apoyo incondicional durante toda mi carrera y  
en especial mientras desarrollaba este trabajo.

***José Luis Meléndez Moreno***

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestras familias por su apoyo moral, por estar siempre dispuestos a colaborar de forma generosa y por la paciencia que soportaron durante la consecución de esta investigación. En especial a nuestros padres y hermanos que de alguna u otra forma son motivo para seguir con nuestros sueños de formarnos como profesionales.

A nuestro codirector de proyecto, Ing. Electrónico Alexis Paolo García Ariza, profesor de la Universidad Industrial de Santander, estamos profundamente agradecidos por su guía, aportes y bibliografía facilitada alrededor de los temas relacionados con las comunicaciones móviles y su colaboración para la consecución de las simulaciones con la herramienta CellView, apoyo por el cual se pudo completar eficientemente este trabajo.

Al Ingeniero Antonio Jaimes y en su nombre al Ministerio de Comunicaciones Dirección Territorial Bucaramanga, agradecemos muy cordialmente sus horas de dedicación desinteresada, así como el soporte técnico y logístico proporcionado para el proceso de mediciones de campo con el sistema integrado TCI sobre su plataforma móvil.

A todas aquellas personas que contribuyeron a que este trabajo se hiciera realidad, reconocemos sus valiosos aportes que sirvieron como engranaje en cada fase del proyecto.

## CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	3
2. ESTADO DEL ARTE DE LAS COMUNICACIONES MÓVILES EN COLOMBIA	6
2.1 INTRODUCCIÓN	6
2.2 BASES DE COMUNICACIONES MÓVILES	6
2.2.1 Arquitectura Básica de las Redes Celulares	6
2.2.2 La Interfaz Aire	10
2.2.3 Handover	11
2.3 EVOLUCIÓN DE LAS COMUNICACIONES MÓVILES	12
2.3.1 Primera Generación	12
2.3.2 Segunda Generación	14
2.3.3 Migración a Tercera Generación	15
2.3.4 Tercera Generación	16
2.3.4 Cuarta Generación	17
2.4 ESTÁNDARES DE TELEFONÍA MÓVIL CELULAR DE MAYOR USO A NIVEL MUNDIAL	19
2.4.1 GSM (Global System for Mobile Communication)	19
2.4.2 TDMA (Time Division Multiple Access)	21
2.4.3 CDMA (Code Division Multiple Access)	23
2.5 TELEFONÍA MÓVIL EN COLOMBIA	25
2.5.1 Operadores de Telefonía Móvil en Colombia	27

3. ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO (CDMA)	29
3.1 INTRODUCCIÓN	29
3.2 DEFINICIÓN DE CDMA	29
3.3 VARIANTES DE CDMA	30
3.3.1 FH-CDMA	31
3.3.2 TH-CDMA	33
3.3.3. DS-CDMA	33
3.3.4 Sistemas híbridos CDMA	39
3.3.6. Características de DS-CDMA	39
3.4. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL SISTEMA DS-CDMA	42
3.4.1. Ventajas	42
3.4.2. Desventajas	43
3.5. ANÁLISIS DE INTERFERENCIA EN UN SISTEMA DS-CDMA	43
3.5.1. Análisis para el enlace directo	43
3.5.2. Análisis para el enlace inverso	45
3.6. CONTROL DE POTENCIA	47
3.6.1. Control de potencia en el enlace inverso	47
3.6.2. Control de potencia en el enlace directo	50
3.7 SECTORIZACION	51
3.8 HANDOVER	52
3.8.1 Soft Handover	53
3.8.2 Softer Handover	54
4. RADIOPROPAGACIÓN	56
4.1 INTRODUCCIÓN	56
4.2PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA SOBRE TERRENO PLANO.	56
4.2.1 Reflexión sobre terreno Plano.	56
4.2.2 Modelo de dos rayos.	59
4.3 PROPAGACIÓN DE RADIO ONDAS SOBRE TERRENO IRREGULAR	62

4.3.1 Propagación sobre terreno rugoso en condiciones de línea de vista (LOS) entre las Antenas.	62
4.3.2 Propagación sobre terreno rugoso en condiciones sin línea de vista (NLOS) entre las antenas.	66
4.4 PROPAGACIÓN EN AMBIENTE URBANO CON EDIFICIOS DISTRIBUIDOS IRREGULARMENTE UBICADOS SOBRE TERRENO ACCIDENTADO	73
4.4.1 Descripción Estadística del Relieve de la Ciudad.	74
4.4.2 Atenuación de la Intensidad de Campo en Zonas con Edificios distribuidos aleatoriamente.	81
5. RADIO PROPAGACIÓN EN AMBIENTE INALÁMBRICO MÓVIL CON TECNOLOGIA CDMA.	91
5.1 INTRODUCCIÓN.	91
5.2 CONDICIONES GENERALES	91
5.2.1 Efectos de gran escala.	92
5.2.2 Efectos de pequeña escala.	93
5.3 RAKE RECEIVER.	103
5.4 MODELOS DE RADIO PROPAGACIÓN UTILIZADOS PARA LA REALIZACION DE SIMULACIONES.	104
5.4.1 Modelo Walfisch – Bertoni.	105
5.4.2 Modelo COST / 231 Walfisch – Ikegami.	106
5.4.3 Modelo COST231 / Walfisch – Ikegami modificado para terreno irregular (UIS).	108
5.5 COMO SOBRELLEVAR LOS INCONVENIENTES DEL CANAL DE BANDA ANCHA.	109
6. PROCEDIMIENTO DE MEDICIONES, REALIZACIÓN DE CAMPAÑAS DE MEDIDAS, SIMULACION Y ANALISIS DE RESULTADOS.	111
6.1INTRODUCCIÓN	111
6.2 PROCEDIMIENTO DE MEDIDAS	111
6.2.1. Determinar la zona a investigar con claridad.	113

6.2.2 Determinar la técnica a ser utilizada en las mediciones para el cálculo de potencia.	114
6.2.3 Realización de las mediciones.	115
6.2.4 Utilizar herramientas que permitan la verificación de los resultados obtenidos.	116
6.2.5 Tabulación y Análisis de datos.	117
6.3 REALIZACIÓN DE CAMPAÑAS DE MEDIDAS	117
6.3.1. Cobertura para la realización de mediciones	123
6.3.2 Equipos de medición.	126
6.3.3 Estaciones base	128
6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	132
6.4.1 Sistema TCI Vs Walfish–Ikegami modificado UIS Omnidireccional	132
6.4.2 Sistema TCI Vs Walfish–Ikegami modificado UIS Sectorizado.	135
6.4.3 Walfish-Ikegami modificado Omnidireccional Vs Sectorizado	136
6.4.4 Celulares CDMA Vs Walfish-Ikegami modificado Omnidireccional	137
6.4.5 Celulares CDMA Vs Walfish–Ikegami modificado UIS Sectorizado.	138
6.4.6 Walfish-Ikegami modificado Omnidireccional Vs Sectorizado	139
6.4.7 Sistema TCI Vs Celulares CDMA	140
6.5. ANALISIS DE SHADOWING	143
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	146
7.1 CONCLUSIONES	146
7.1.1 Estado del Arte de las Comunicaciones Móviles en Colombia.	147
7.1.2 Sistema CDMA	147
7.1.3 Radiopropagación	147
7.1.4 Radio propagación en ambiente inalámbrico móvil con tecnología CDMA en entorno Andino.	148
7.1.5 Campañas de medidas y simulaciones	149
7.2 RECOMENDACIONES	151
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
ANEXOS	159

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 2.1. Elementos de un sistema celular estándar, usando Terminología GSM.	7
Figura 2. 2 Funciones de la interfaz aire.	10
Figura 2.3. Arquitectura básica de una Red GSM.	20
Figura 2.4. Principios del acceso TDMA. a) Utilizando FDD. b) Utilizando TDD	22
Figura 3.1 Multiplexación por división de código.	30
Figura 3.2 Uso de espectro en FH-CDMA por un usuario.	32
Figura 3.3 Uso del espectro en TH-CDMA por un usuario.	33
Figura 3.4 Sistema DS- CDMA básico	34
Figura 3.5 Uso del espectro en DS-CDMA por un usuario.	36
Figura 3.6 Proceso de ensanchado de la señal de datos.	37
Figura 3.7 Esquema del receptor rake de 4 ramas.	41
Figura 3.8 Interferencia debida a varias celdas en un sistema CDMA.	44

Figura 3.9 Interferencia debida a varios móviles en un sistema CDMA	46
Figura 3.10 División de celdas por sectorización	51
Figura 3.11 Soft Handover en CDMA	53
Figura 3.12 Softer Handover en CDMA	55
Figura 4.1 Representación Geométrica del efecto de una fuente imaginaria debido a la reflexión sobre terreno plano.	59
Figura 4.2 Geometría del modelo de dos rayos.	60
Figura 4.3 Característica de radio propagación para terreno plano vs. Espacio libre.	62
Figura 4.4 Reflexión sobre una superficie de terreno irregular.	63
Figura 4.5 Presentación de la aproximación de Kirchhoff para terreno liso.	65
Figura 4.6 Geometría de reflexión de la superficie casi lisa.	65
Figura 4.7 Difracción por un borde de una obstrucción.	67
Figura 4.8 Geometría de la difracción por un filo de cuchillo.	68
Figura 4.9 Difracción por un filo de cuchillo con reflexión de tierra.	69
Figura 4.10 Difracción sobre un objeto redondeado.	71

Figura 4.11 Geometría de la difracción por múltiples filos de cuchillo.	72
Figura 4.12 Superficie de relieve irregular $z = Z(x,y)$	74
Figura 4.13 Distribución de los edificios entre los puntos $A(r_1)$ y $B(r_2)$ .	76
Figura 4.14 Observación del punto $r_2$ con respecto al punto $r_1$	77
Figura 4.15 Geometría tridimensional de dispersión sobre una pantalla.	78
Figura 4.16 Geometría Bidimensional de la simple dispersión desde una pantalla.	83
Figura 4.17 (a) Geometría de la única dispersión con única difracción sobre una capa de terreno edificada. (b) Geometría de la doble dispersión y doble difracción sobre una capa de terreno edificada.	88
Figura 5.1 Comportamiento de la selectividad de frecuencia. Afecta dos señales transmitidas en forma diferente.	94
Figura 5.2 Comportamiento de la variación de tiempo del canal. Afecta dos pulsos transmitidos en diferente tiempo en forma diferente.	95
Figura 5.3 Retardo de Ensanchamiento (Delay Spread).	97



Figura 6.10 Patrón de radiación H-V de la antena DB874G90R. a) Plano vertical. b) Plano horizontal	130
Figura 6.11 Sectorización antenas de las estaciones base en estudio.	131
Figura 6.12 Proceso de simulación en CellView	132
Figura 6.13 Medidas de campo del equipo TCI comparado con el modelo Walfish-Ikegami Modificado UIS en [28] para antenas Omnidireccionales.	134
Figura 6.14 Medidas de campo del equipo TCI comparado con el modelo Walfish-Ikegami Modificado UIS sectorizado.	135
Figura 6.15 Medidas de campo Celulares 3G CDMA comparado con el modelo Walfish-Ikegami Modificado en [28] para antenas Omnidireccionales.	137
Figura 6.16 Medidas de campo de los celulares CDMA comparado con el modelo Walfish-Ikegami Modificado UIS para antenas sectorizadas.	138
Figura 6.17 Medidas de campo equipo TCI comparado con mediciones realizadas con el móvil 3G CDMA	140
Figura 6.18 Característica de Shadowing del sector. Funciones de densidad de probabilidad con el equipo TCI.	144
Figura 6.19 Característica de Shadowing del sector. Funciones de densidad de probabilidad Kyocera 1135.	145

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1 Funciones de Walsh de 64 bits	35
Tabla 6.1 Parámetros para ambas estaciones base y valores de entrada establecidos para todas las simulaciones.	131
Tabla 6.2 Paralelo estadístico promedio para el modelo Walfish-Ikegami modificado Omnidireccional y Sectorizado. Mediciones equipo TCI.	136
Tabla 6.3 Paralelo estadístico promedio para el modelo Walfish-Ikegami modificado Omnidireccional y Sectorizado. Mediciones celulares CDMA.	139
Tabla 6.4 Comparación estadística entre el sistema TCI con el celular Kyocera 1135 3G CDMA y con el Kyocera Phantom respectivamente.	141

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. MEDIDAS DE CAMPO: RESULTADOS. ESTADÍSTICAS POR RUTA SEGÚN EL BARRIO	159
ANEXO B. SIMULACIONES EN CELLVIEW: RESULTADOS. TABULACION ESTADISTICA DE MEDIDAS DE CAMPO CONFRONTADAS CON LAS SIMULACIONES	170
ANEXO C. PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DB874G90R	179
ANEXO D. MULTI-PORTADORA CDMA EN IMT-2000	182

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Realizar un estudio de la radio propagación electromagnética en un entorno semi-urbano<sup>1</sup> con características topográficas no uniformes haciendo uso de la tecnología CDMA, teniendo en cuenta el contexto colombiano.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Conocer el estado del arte de las comunicaciones móviles en Colombia y así mismo asimilar la evolución de los diferentes sistemas de telefonía celular a nivel mundial.
- Efectuar un análisis de la tecnología CDMA, entendiendo su definición, funcionamiento y ventajas respecto a otras formas de modulación que actúen como interfaz aire en los sistemas de telefonía móvil.
- Realizar un estudio de Radio Propagación en la telefonía móvil celular que permita establecer las condiciones que afectan el proceso de comunicación inalámbrica en presencia de terreno escarpado, en la zona comprendida en los barrios San Luis, Provenza, Bucaramanga y la Victoria de la ciudad de Bucaramanga (Colombia).
- Analizar la radio propagación electromagnética en un ambiente inalámbrico móvil con tecnología CDMA, teniendo en cuenta las condiciones topográficas no uniformes presentes en las ciudades ubicadas en la región andina.
- Realizar campañas de medidas que proporcionen datos experimentales sobre el comportamiento de las ondas electromagnéticas haciendo uso de un teléfono móvil celular con tecnología CDMA y el sistema integrado TCI móvil del Ministerio de Comunicaciones Dirección Territorial Bucaramanga.

---

<sup>1</sup> Superficie caracterizada por presentar áreas edificadas sobre terrenos con vegetación.

## RESUMEN

**TÍTULO:** RADIOPROPAGACIÓN EN LAS COMUNICACIONES MÓVILES CON TECNOLOGÍA CDMA EN PRESENCIA DE TERRENO ESCARPADO. \*

**AUTORES:** JOSE LUIS MELÉNDEZ MORENO

CRISTIAN ALEXIS GARCIA LÓPEZ \*\*

**PALABRAS CLAVES:** CDMA, Radiopropagación, Región Andina, Terreno escarpado, TCI, Cellview, Shadowing, Path Loss.

**DESCRIPCIÓN:** Las comunicaciones basadas en Spread Spectrum presentan una serie de peculiaridades que la hacen merecedora de estudios especiales. El presente proyecto concentra su atención en el sistema de comunicaciones móviles CDMA 2000 haciendo énfasis en la propagación electromagnética en regiones semi-urbanas ubicadas en terrenos montañosos.

Se comienza por establecer las bases de los modelos de radio propagación en sistemas de banda ancha para condiciones topográficas propias de las ciudades de la región andina; Se presentan las bases del sistema celular CDMA y la radio propagación electromagnética en presencia de terreno escarpado para esta tecnología.

El trabajo presenta un análisis de una serie de resultados obtenidos de simulaciones con la herramienta CellView basada en sistemas de información geográfico (GIS), mediciones de campo con dos teléfonos celulares Kyocera 3G CDMA 1X y con el equipo TCI del Ministerio de Comunicaciones de Colombia, regional Santander. Las simulaciones están basadas en el modelo "COST 231 Walfish-Ikegami modificado UIS", tomado de trabajos anteriores del grupo de investigación RadioGIS de la Universidad Industrial de Santander, Colombia. Las comparaciones estadísticas muestran una desviación standard de 7.01 dBm, la cual resulta ligeramente mejor que la presentada en trabajos publicados internacionalmente para el análisis de algoritmos de propagación de terreno plano. Los resultados del proyecto sirvieron de base para nuevos ajustes al algoritmo en estudio.

---

\* Tesis

\*\* Facultad de Ciencias Fisicomecánicas  
Programa de ingeniería Electrónica  
Director: PhD. Homero Ortega Boada

## SUMMARY

**TITLE:** RADIOPROPAGATION ON MOVIL COMMUNITIES WITH CDMA TECHNOLOGY IN PRESENCE OF CRAGGY FIELD.

**AUTHORS:** JOSE LUIS MELENDEZ MORENO\*  
CRISTIAN ALEXIS GARCIA LOPEZ \*\*

**KEY WORDS:** CDMA, Radio propagation, Andina region, Craggy field, TCI, Cellview, Shadowing, Path Loss.

**DESCRIPTION:** Spread Spectrum based communications are followed by series of peculiarities, so specialized studies are deserved. The present project is focused in the CDMA 2000 system for Mobile Telecommunications and makes emphasis in electromagnetic propagation over middle-urbans regions located on mountain environment.

At first, the bases for modeling radio propagation applied to wide band systems in cities with Andean region topographical conditions have been established. Then, the CDMA cellular system and radio propagation bases are complied for this technology in presence of hilly terrain.

An analysis of the series of results obtained from simulations with the Cellview tool based in geographical information systems (GIS) is presented, as well as electromagnetic field measurements with the help of two cellular stations (Kyocera 3G 1X 1135 and Kyocera 3G 1X Phantom) and the TCI equipment of the Colombia's Communications Ministry, regional Santander. The simulations were based on the "UIS Modified COST 231 Walfish- Ikegami" model, which has been taken from previous research works of the RadioGIS group at the Universidad Industrial de Santander, Colombia. The statistical comparisons obtained, show a standard deviation of 7.01 dBm, which is lightly better than the ones taken from other internationally accepted works done for plane terrain conditions. The results of this project have been useful for doing new adjustment to the algorithm of interest.

---

\* Work of Grade

\*\* Facultad de Ciencias Fisicomecánicas  
Program of Electronic Engineer  
Director: PhD. Homero Ortega Boada

## 1. INTRODUCCIÓN

El grupo de investigación RadioGIS de la Universidad Industrial de Santander, cuenta con bases sólidas para la realización de estudios de radio propagación en sistemas TDMA y GSM. Sin embargo, con la fuerza que está tomando el sistema CDMA y debido a las peculiaridades que presentan las comunicaciones de Espectro ensanchado, se hace necesario crear las bases para efectuar tales estudios teniendo en cuenta la tecnología CDMA y así ampliar el potencial del grupo RadioGIS en el desarrollo de nuevos proyectos en las comunicaciones móviles.

Cabe anotar que pocos estudios de radio propagación en banda ancha, particularmente haciendo uso de la tecnología CDMA se han llevado a cabo para un ambiente semi-urbano afectado por terreno ondulatorio, en un escenario como la región Andina, con amplia presencia de colinas, y ninguna herramienta de planificación existente en el mercado considera de forma precisa estos efectos.

Para la correcta elaboración de un modelo de propagación es primordial disponer de la información necesaria que permita la determinación de los parámetros que afectan a la radio propagación electromagnética en presencia de regiones semi-urbanas sobre terreno montañoso, teniendo en cuenta los diferentes obstáculos ubicados entre la estación base y los abonados móviles. Por lo tanto es prioritario establecer las pérdidas por trayectoria para los diferentes tipos de ambientes teniendo en cuenta las particularidades del terreno y la influencia de las mismas sobre la propagación de las ondas electromagnéticas.

Así mismo, debido a la importancia que han adquirido los nuevos sistemas de comunicación móvil celular se hace necesario un mejor entendimiento de los mismos con el objetivo de profundizar en sus particularidades y por

consiguiente establecer las características de radio propagación inherente a ellos.

En particular y debido a las grandes ventajas ofrecidas por el sistema de comunicación móvil celular CDMA que se ven reflejadas en la mayor capacidad de la red, seguridad en las transmisiones, robustez de la comunicación y gran velocidad en la transmisión de datos, cobra trascendencia la determinación de dichas características de propagación para este sistema.

La importancia del presente trabajo se ve reflejada en el establecimiento de un punto de partida para la creación de un modelo de radio propagación habilitado para las condiciones topográficas propias de las ciudades de la región andina, en el cual se presentan las bases del sistema de telefonía celular de banda ancha CDMA, la radio propagación electromagnética sobre terreno semi-urbano en presencia de terreno escarpado haciendo uso de esta tecnología, y una serie de datos experimentales que permitan ajustar el modelo a condiciones reales de radio propagación electromagnética.

Este modelo se convertirá en una herramienta necesaria en la búsqueda de la optimización de los sistemas de comunicación móvil celular de la región y el desarrollo de los sistemas de telefonía móvil de tercera generación donde se debe buscar solución al desempeño del mecanismo de acceso (parámetros que afectan la interfaz aire) y el ancho de banda disponible para las aplicaciones multimedia, que dependen en gran medida del entorno en que se desarrolla la radio propagación.

Se estimó conveniente tener en cuenta trabajos realizados anteriormente relacionados con el tema en mención tales como el realizado por A.P.

García<sup>2</sup>, en el cual se consideran las características topográficas reales de un sector de la ciudad de Bucaramanga ( Santander-Colombia ), trabajando con tecnología TDMA.

Los resultados del proyecto son esenciales para los estudios que adelantan el grupo RadioGIS en la búsqueda de modelos de propagación apropiados para ciudades que presenten relieve geográfico escarpado, ya que los modelos a desarrollar deben responder a normas internacionales. El estudio propuesto se convierte además, en un aporte para el desarrollo de las comunicaciones móviles en nuestro país que merece un estudio especial debido a la especificidad de su relieve.

## **1.1 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO**

El presente trabajo hace parte de la propuesta de Investigación Aplicada “Diseño de una Plataforma Basada en GIS para el Estudio de Modelos de Radio Propagación en la Zona Andina” presentada ante el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José De Caldas” -COLCIENCIAS- por parte de los grupos de investigación RADIO GIS (Grupo de Investigación en Telecomunicaciones UIS, Bucaramanga-Colombia), I2T-ICESI (Grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones ICESI, Cali-Colombia), MCG-UPV (Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles UPV, Valencia-España) y la empresa TESAMERICA (Bogotá-Colombia) por lo cual su contenido describe del proceso para la obtención y verificación de desempeño de un algoritmo que considera la influencia del relieve en la propagación electromagnética para un entorno semi-urbano.

En este documento se presentan las bases del sistema de telefonía celular de banda ancha CDMA, la radio propagación electromagnética sobre terreno

---

<sup>2</sup> A. P. García., “Cobertura para sistemas móviles celulares en entorno urbano escarpado”. 2002.

semi-urbano en presencia de terreno escarpado haciendo uso de esta tecnología, y una serie de datos experimentales que permitan ajustar el modelo a condiciones reales de radio propagación electromagnética. Para empezar, en el capítulo 2 se revisarán los fundamentos de las comunicaciones móviles celulares teniendo como base la actualidad en el entorno colombiano. El texto presenta generalidades del estado del arte de las comunicaciones móviles en Colombia, su evolución y el panorama actual del sector en el país.

En el capítulo 3 se estudian entre los sistemas de comunicación de banda ancha, los conceptos sobre la tecnología de acceso múltiple por división de código (CDMA) que cobran gran importancia, ya que en Colombia esta siendo utilizada actualmente y es motivo fundamental para el desarrollo de este proyecto.

En el capítulo 4, Con base en la literatura estudiada y las características propias de la región andina en la cual se presenta relieve geográfico no uniforme, se presentarán los parámetros que intervienen en la radio propagación electromagnética en los sistemas de comunicación móvil celular. De igual forma, en el capítulo 5 se presentarán las características de pérdidas por trayectoria ocasionadas por las diferentes condiciones del terreno y se hará énfasis en aquellas que tengan mayor influencia en el sistema de comunicación celular CDMA.

En el capítulo 6, Con el fin de obtener datos experimentales que proporcionen información sobre el comportamiento de las ondas electromagnéticas en un entorno semi-urbano haciendo uso de la tecnología CDMA, se realizarán mediciones con un teléfono móvil celular 3G CDMA para medir la potencia recibida y el sistema integrado TCI móvil del Ministerio de Comunicaciones Dirección Territorial Bucaramanga, que mide la intensidad de campo eléctrico recibido y cuenta con equipos de

radiolocalización para su referenciación en el espacio.

Se realizará un análisis de las campañas de medidas efectuando la comparación entre los resultados obtenidos con el teléfono móvil CDMA y el sistema integrado TCI móvil del Ministerio de Comunicaciones y por supuesto con las simulaciones. También se mencionan los argumentos sobre los cuales se llevaron a cabo las campañas de medidas, un análisis final de los resultados obtenidos en simulación, como en los resultados derivados de mediciones en campo, todo evaluado por medio de indicadores estadísticos.

Finalmente se presentan las conclusiones del presente trabajo de investigación y algunas recomendaciones. De igual forma se presenta la bibliografía utilizada como apoyo en el proceso de este proyecto y algunos anexos que contienen información de medidas de campo y otros elementos fundamentales en la consecución del mismo. Toda esta información será de gran importancia para futuras investigaciones en el área.

## **2. ESTADO DEL ARTE DE LAS COMUNICACIONES MÓVILES EN COLOMBIA.**

### **2.1 INTRODUCCIÓN.**

Para una mejor comprensión de los conceptos relacionados con el sistema de comunicación móvil CDMA (Code Division Multiple Access) y los conceptos de radio propagación involucrados en la realización del presente trabajo, se hace una introducción a las nociones básicas de las comunicaciones móviles, la evolución histórica de los sistemas de telefonía móvil celular, los principales estándares de comunicación celular a nivel mundial y se realiza la contextualización de los sistemas de telefonía móvil celular en el ámbito Colombiano.

### **2.2 BASES DE COMUNICACIONES MÓVILES.**

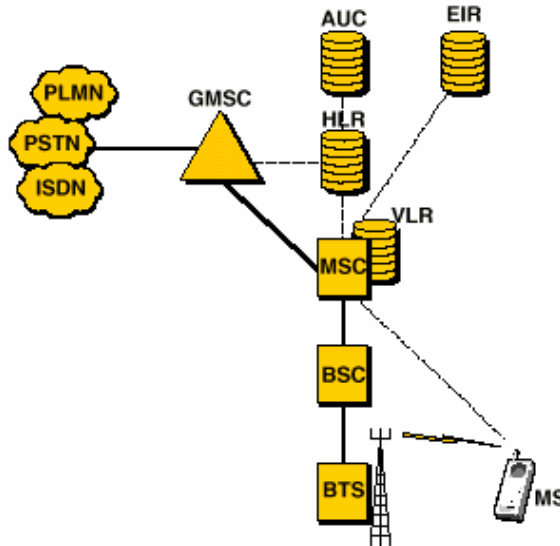
#### **2.2.1 Arquitectura Básica de las Redes Celulares.**

La arquitectura básica de una red celular es esencialmente la misma para la mayoría de redes móviles, aún cuando sus elementos son denominados en forma diferente en cada uno de los estándares de comunicaciones móviles existentes.

En la figura 2.1 se muestra la arquitectura básica de una red GSM y a continuación se enumera la terminología básica usada en este sistema. Un análisis más detallado se puede encontrar en Understanding Telecommunications II [8].

Figura 2.1. Elementos de un sistema celular estándar, usando terminología GSM.

### Network elements in GSM



\* Fuente: Understanding Telecommunications II, Ericsson, STF, Student literature.

- MS: Mobil Station.
- BTS: Base Transceiver Station ( o BS ).
- BSC: Base Station Controller.
- BSS: Base Station Subsystem.
- MSC: Mobile Switching Centre.
- GMSC: Gateway Mobile Switching Centre.
- HLR: Home Location Register.
- VLR: Visitor Location Register.
- AUC: Authentication Centre Stores.
- EIR: Equipment identity register.

### • Mobile Station.

Una estación móvil (MS) puede ser un teléfono móvil, un fax con un acceso de radio o un computador portátil equipado con un radio módem.

- **Base Transceiver Station.**

Una estación base transceptora (BTS) contiene equipo para transmisión y recepción, antenas para una o más celdas, además de equipo para encriptación y medición de intensidad de señal, así como dispositivos para la comunicación con el controlador de la estación base (BSC).

- **Base Station Controller.**

El controlador de la estación base (BSC) establece los canales de radio de tráfico y señalización para el centro de conmutación móvil. Además monitorea el acceso a la red y maneja el handover en la estación base que controla. El BSC sólo se encuentra en el estándar GSM, en otros estándares el centro de conmutación móvil se encarga de dichas funciones.

- **Mobile Switching Centre.**

El centro de conmutación móvil (MSC) es un nodo de conmutación que tiene funciones especiales que se requieren en las redes móviles, que se relacionan principalmente con el manejo del handover entre los MSCs y diferentes redes públicas locales móviles (PLMN). Una red PLMN puede tener uno o varios MSCs dependiendo del tamaño de la red y del número de suscriptores.

- **Gateway Mobile Switching Centre**

El centro de conmutación móvil de entrada (GMSC) es un centro de conmutación móvil especializado que sirve de interface a otras redes. Todas las conexiones desde y hacia las redes móviles pasan a través del GMSC. Un GMSC no necesita manejar datos de suscriptores, pero debe ser capaz

de manejar diferentes estándares de señalización para su comunicación con otras redes.

- **Home Location Register.**

Los suscriptores móviles deben estar permanentemente registrados en donde quiera que estén en el sistema, por lo cual las redes móviles deben incluir una o más bases de datos ( HLR ) para el almacenaje permanente de los datos de los suscriptores.

- **Visitor Location Register.**

En un registro de localización de visitantes (VLR) se almacenan los datos de los suscriptores que están temporalmente en el área de servicio de un MSC. Normalmente cada MSC tiene su propio VLR.

- **Authentication centre stores.**

El centro de autenticación (AUC) almacena información segura, por ejemplo claves de encriptación, de todos los suscriptores de la red.

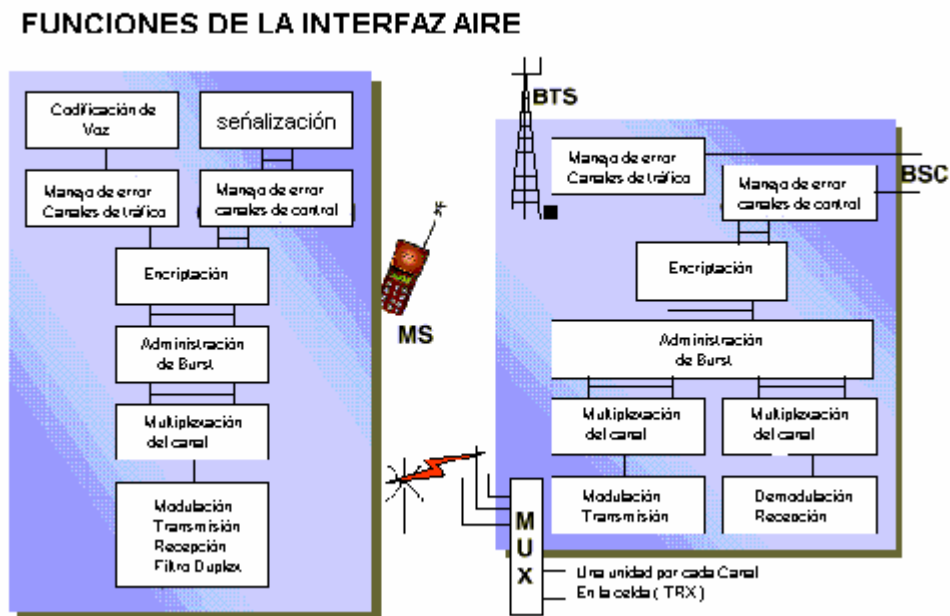
- **Equipment identify register.**

El registro de identificación de equipo (EIR) almacena información de la identificación de cada móvil. El EIR es usado para verificar si un móvil se encuentra reportado como robado o inhabilitado por otra razón.

## 2.2.2 La Interfaz Aire.

La interfaz aire es la parte de la red que está entre el terminal móvil y la estación base. Físicamente, está delimitada por la estructura de la celda. Las características individuales de las celdas son determinadas por la estructura de las estaciones base y el medio que las rodea.

Figura 2.2. Funciones de la interfaz aire.



\* Fuente: Understanding Telecommunications II. Ericsson, STF, Student literature.

- **Patrones de Celda**

Las características de una celda están determinadas por dos factores básicos: el área geográfica alcanzada (cobertura) y las frecuencias que le han sido asignadas. La cobertura de una celda es dimensionada por la selección del tipo de antena, la posición de la antena y su potencia de salida.

Teóricamente, una celda puede ser descrita como un hexágono, pero su cobertura geográfica debe ser determinada por medio de diferentes tipos de mediciones.

A cada celda se le asigna un número de frecuencias para los canales de tráfico y de control. El número de canales de tráfico está determinado por la intensidad de tráfico esperada y el umbral de congestión, que es el GoS. La intensidad de tráfico es calculada con el número promedio de llamadas simultáneas por unidad de tiempo.

Para cubrir un área geográfica extensa, es necesario un gran número de celdas y las frecuencias disponibles deberán ser reutilizadas. Ya que dos celdas adyacentes no pueden usar las mismas frecuencias debido a la interferencia que podría ocasionarse, debe establecerse una distancia mínima de reuso para prevenir la llamada interferencia co-canal. La distancia de reuso está definida como la relación entre la intensidad de señal deseada (en la celda) y la intensidad de la señal no deseada (de las celdas cercanas que usen la misma frecuencia). Esta relación es llamada relación portadora a interferencia (C/I).

### **2.2.3 Handover.**

Ya que un terminal móvil a menudo está en movimiento mientras está en curso una llamada, la señal de radio puede deteriorarse, especialmente en los límites de la celda. Para enfrentarse a este problema, el sistema debe examinar si existen canales de tráfico libres en las celdas vecinas en los cuales se puede mejorar la calidad de la señal y conmutar la llamada a ese canal. Este proceso incluye tres fases:

- Monitoreo continuo de la intensidad de la señal y la relación señal a ruido entre el móvil y la estación base.
- Análisis de selección de una celda y un canal de tráfico disponible.
- Conmutación de la llamada al nuevo canal y a la nueva celda.

A las dos primeras fases se les denomina localización. Un análisis más extenso se presenta en *understanding telecommunications II* [8]).

El Handover es usado para mantener la conexión de una llamada a un móvil incluso cuando el móvil se mueva fuera de los límites de la celda. Son posibles varios tipos de handover dentro de una BSC, entre 2 BSC, o entre dos MSC.

El reestablecimiento de llamada es la forma extrema de un handover, en la cual la llamada actual se corta porque el móvil entra en una zona sin cobertura (por ejemplo un túnel). El MSC mantiene la llamada establecida durante un tiempo predefinido, y si el móvil solicita un reestablecimiento dentro de ese tiempo (cuando reingresa a la zona de cobertura), el MSC es capaz de reconectar la llamada.

## **2.3 EVOLUCIÓN DE LAS COMUNICACIONES MÓVILES.**

### **2.3.1 Primera Generación**

En 1973, en Estados Unidos, mientras trabajaba para Motorola, Martin Cooper implementó el primer radioteléfono, convirtiéndose en el pionero de esta tecnología; a él se le considera como "el padre de la telefonía celular". Pero no fue sino hasta 1981, que los países nórdicos introdujeron el primer sistema celular comercial al que se le llamó NMT (Telefonía Móvil Nórdica), el cual fue especificado por la administración de telecomunicaciones nórdicas y fue implementado en Europa, el Medio Oriente y Asia.

Por otro lado, en Estados Unidos, el consorcio TIA/EIA/ANSI adoptó reglas para la creación de un servicio comercial de telefonía celular, y en 1983 se introdujo el estándar de comunicación celular AMPS (American mobile phone system). En 1985, en el Reino Unido se realizó la modificación del estándar de comunicación celular AMPS, creando TACS (Total Access Communication System) implementado en dicho país y posteriormente usado en algunos países alrededor del mundo.

Con ese punto de partida, en varios países se diseminó la telefonía celular como una alternativa a la telefonía convencional inalámbrica. La tecnología tuvo gran aceptación, por lo que a los pocos años de implantarse se contaba con un gran número de abonados a las redes celulares y se empezó a saturar el servicio.

La primera generación de la telefonía móvil (1G) se caracterizó por ser analógica y estrictamente para voz. La calidad de los enlaces era muy baja, tenían poca velocidad (2400 baudios en promedio). Los terminales eran bastante voluminosos, la cobertura se limitaba a grandes ciudades y carreteras principales y sólo transmitían voz. En cuanto a la transferencia entre celdas, era muy imprecisa ya que contaban con una baja capacidad (Basadas en FDMA, Frequency Division Multiple Access) y, además, la seguridad prácticamente no existía.

Debido a estos inconvenientes, apareció la necesidad de desarrollar e implantar otras formas de acceso múltiple al canal y transformar los sistemas analógicos a digitales, con el objeto de darles cabida a más usuarios, por lo tanto se evolucionó hacia la segunda generación 2G.

### **2.3.2 Segunda Generación.**

La segunda generación se originó en 1992, con la llegada de los estándares de comunicación celular GSM (Global System for mobile communication) D-AMPS (Digital AMPS) basado en TDMA (Time División Múltiple Access) y PDC (Personal/Pacific digital cellular), caracterizados principalmente por sus canales de tráfico digitales. Sin embargo, estos estándares pueden incluir canales de control análogos y digitales.

En el sistema GSM, los canales de control y de tráfico son digitales. Este estándar fue especificado por European telecommunications standards institute (ETSI) y entró en operación comercial en 1992.

Por otra parte, el estándar D-AMPS es una versión modificada de AMPS, en el cual se emplean canales de tráfico digital, sin embargo está habilitado para incluir canales de tráfico digital y análogo. D-AMPS fue introducido comercialmente en 1991 en la misma área de distribución de AMPS.

En 1993, en Japón fue especificado el estándar digital PDC por la RCR en cooperación con 11 empresas del sector de las cuales tres no eran japonesas. Este sistema fue introducido comercialmente en 1993. La interfaz aire es muy similar a la utilizada en D-AMPS (TDMA), mientras que la arquitectura de y servicios de red es muy similar a GSM. En sus inicios PDC fue sólo instalado en algunos países de Asia.

La segunda generación permitió, la introducción del servicio de transmisión de datos. Se incrementó la capacidad del canal de 9.6 Kbit/s a 14.4 Kbit/s. Los terminales redujeron en gran medida su volumen, la cobertura se pudo extender a diferentes áreas y se logró incrementar la capacidad de la red de telefonía móvil. Para del acceso al canal se implementó la técnica llamada TDMA, mejorando la transferencia entre celdas y la seguridad de la red.

### **2.3.3 Migración a Tercera Generación.**

En la actualidad, se están empezando a desplegar sistemas que constituyen lo que se ha denominado generación 2,5 (HSCSD, GPRS, EDGE) que harán de puente entre los de segunda generación y la telefonía móvil de tercera generación (la UMTS). Esta última responde a un intento de estandarizar las comunicaciones móviles a nivel mundial, aunque ya existen diferencias entre EEUU y el resto del mundo. En los sistemas de tercera generación se esperan grandes velocidades de transmisión, por lo que se cree que se convierta en la forma más habitual de acceso a Internet. Permitirá la transmisión de todo tipo de comunicaciones: voz, datos, imágenes, video, radio. El ancho de banda considerado es de 5 MHz, con lo cual se logra compatibilidad con redes existentes y se pueden proporcionar tasas de bit de 144 Kbps y 384 Kbps con facilidad, esto haciendo uso de la conmutación de paquetes en la telefonía móvil, tal como en GPRS y en EDGE.

Para el caso del estándar IS-95, el cual utiliza tecnología de Acceso Múltiple por División de Código (CDMA), la tecnología escogida para la evolución hacia tercera generación es cdma2000 (Ver capítulo 3). Esta tecnología es del tipo red síncrona, con tasa de chip de 3.6864 Mcps para el enlace de bajada de asignación directa de 5 MHz, y de 1.2288 Mcps para el enlace de bajada de multiportadora. Tal como para IS-95, los códigos de esparcimiento para cdma2000 se generan utilizando diferentes desplazamientos de fase de la misma secuencia de longitud máxima.

De acuerdo a este estándar, la tecnología dominante para la evolución hacia tercera generación es WCDMA. La tecnología WCDMA es del tipo asíncrona, con esparcimiento directo y tasa de chip de 4.096 Mcps. El esquema WCDMA ha sido desarrollado como un esfuerzo conjunto entre ETSI (Instituto de Estándares en Telecomunicaciones y Electrónica de Europa) y ARIB (Asociación para Negocios y Radio Industria de Japón). WCDMA

maneja canales de 1.25, 5, 10 y 20 Mhz de ancho de banda, con tasas de chip de 1.024, 4.096 ,8.192 y 16.384 Mcps respectivamente.

Para el estándar IS-136, el cual utiliza tecnología TDMA, la tecnología dominante para la evolución hacia tercera generación es UWC (Universal Wireless Communications), la cual adoptará el modo de alta velocidad (136HS).

#### **2.3.4 Tercera Generación.**

Dentro de las actuaciones en el contexto de la 3G se pueden observar dos ejes en torno a los cuales se desarrollan las iniciativas relativas a normalización y armonización: IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000) y UMTS (Universal Mobile Telephone System). IMT-2000 es la norma global, de la UIT, el organismo de normas internacionales dependiente de la Organización de Naciones Unidas. Esta norma contempla tres grupos de velocidades (144 Kbps, 384 Kbps y 2 Mbps) y las bandas de frecuencias 1885-2025 MHz y 2170-2200 MHz, así como 1980-2010 MHz y 2170-2200 MHz para satélites.

##### **• UMTS**

UMTS es la sigla de "Universal Mobile Telecommunications System", la cual es considerada como la tercera generación de comunicaciones móviles inalámbricas. UMTS se caracteriza básicamente por la alta capacidad de transmisión de datos ofreciendo hasta 2Mbps.

Dentro de su concepto, UMTS proporciona servicio satelital, fijo terrestre y móvil terrestre, con el objetivo de dar cubrimiento a nivel mundial. Este aspecto, hará que exista una diversidad de celdas capaces de prestar el servicio dependiendo de la zona donde se encuentre el usuario, existiendo además la prestación satelital como último recurso.

El UMTS, que se basa en la tecnología WCDMA (Acceso Múltiple por División de Código de banda ancha), permitirá dar un nuevo paso hacia la satisfacción de la creciente demanda de servicios de datos/Internet. Con UMTS es posible transmitir voz y datos en modo circuito, así como datos en modo paquete. Los sistemas celulares 3G utilizarán el WCDMA esperando alcanzar una velocidad de 384 kbit/s, con un máximo de 2 Mbit/s por usuario.

### **2.3.5 Cuarta Generación.**

La diferencia básica entre una red de 3ra y otra de 4ta generación es la tasa de bit disponible para el usuario. Mientras que las redes de 3ra generación ofrecen accesos hasta de 384 Kbps, con picos de hasta 2 Mbps (con los que podría manejar servicios de audio, datos e imágenes), las redes de 4ta generación ofrecen accesos multimedia, en las que podrá manejarse la transferencia de video en tiempo real, con velocidades equivalentes a las de una LAN básica (10 Mbps) y mayores. Para lograr esto, se necesita manejar anchos de banda de al menos 20 MHz por canal, por lo que la tecnología se considera de banda ancha. Puesto que la potencia necesaria para el transmisor es directamente proporcional al ancho de banda de la señal, el área de cobertura de una estación base para red de 4ta generación es de diámetro reducido; por lo que se pronostica que se limitará a una picocelda (hasta de 200 m de radio). Por tanto, la tecnología inalámbrica de 4ta generación no vendrá a sustituir a la de 3ra, sino a complementarla.

#### **• Factores para el Desarrollo de 4G.**

Los factores que pueden influir en el desarrollo de las redes de 4ta generación son, entre otros:

1. El auge del Internet, que cada vez se utiliza más por medios inalámbricos.

2. La proliferación de asistentes digitales personales y computadoras personales de bolsillo.
3. La disponibilidad de servicios de valor agregado a los usuarios de Internet móvil (transacciones bursátiles, reservaciones aéreas, etc.).
4. La oferta de servicios llamados transparentes, donde los dispositivos interactúan con otros dispositivos, a nombre de los usuarios.

### **Tecnologías para el Desarrollo de 4G.**

Las tecnologías que pueden ser decisivas en el desarrollo de las redes de 4ta generación son:

1. El Modo de Transferencia Asíncrono (ATM), como red dorsal de la Red Universal Multimedia (RUM), que permitirá ofrecer diversos servicios con calidad garantizada.
2. El protocolo IP, como la parte de transporte de la RUM (probablemente en esta red no se usen mas números de abonado sino direcciones de red).
3. La tecnología de antenas inteligentes (para aprovechar la dimensión espacial de los métodos de acceso al medio).
4. La tecnología de modulación/transmisión inalámbrica de multicanalización en frecuencia con portadoras ortogonales OFDM (para lograr una eficiencia espectral óptima).
5. La tecnología de radios programables ("Software Radios"), la cual permitirá que una terminal móvil pueda hacer "Handoff" desde una célula perteneciente a un tipo de red, hacia otra célula perteneciente a una red con tecnología inalámbrica diferente.
6. La tecnología de redes locales inalámbricas (WLAN's) de banda ancha (que brindarán el acceso a la RUM al usuario móvil).

## **2.4 ESTÁNDARES DE TELEFONÍA MÓVIL CELULAR DE MAYOR USO A NIVEL MUNDIAL.**

### **2.4.1 GSM (GLOBAL SYSTEM FOR MOBILE COMMUNICATION)**

GSM (Sistema Global para comunicaciones Móviles) es un sistema digital de telefonía móvil que es ampliamente utilizado en Europa y en otros países del mundo actualmente. GSM utiliza una variación del acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), digitaliza y comprime voz y datos, y después los envía en un canal junto con otras dos series de datos del usuario en particular. Opera en las bandas de frecuencia de 900, 1800 y 1900 MHz. GSM tiene en la actualidad más de 500 millones de usuarios en todo el mundo y está disponible en más de 120 países; ya que varios operadores de GSM tienen acuerdos de Roaming con otros operadores, los usuarios frecuentemente continúan utilizando sus teléfonos cuando han viajado a otros países.

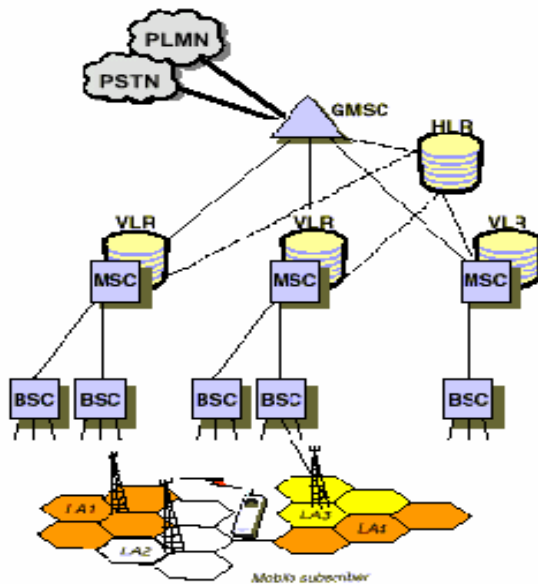
GSM incluye sistemas de conmutación de paquetes (por ejemplo GPRS, que eleva la velocidad de 9.6k a 14.4k o más) y conmutación de circuitos, nodos de control de radio, y sistemas de estación base (Estaciones Base transmisoras/receptoras y controladores de estaciones base). Tiene integradas bases de datos de la red, plataformas de servicio, y nodos de administración de la red.

#### **• Elementos de Conmutación de red en GSM.**

En la figura 2.3 se muestra la arquitectura de una pequeña red GSM que incluye tres MSCs con sus respectivos VLRs, un GMSC y un HLR. Además dos redes de acceso son incluidas. La red interactúa con una red PSTN (Public switched telephone network) y otra PLMN (Public land Mobile Network). Los canales de tráfico de acceso y del núcleo de red son

diferentes. La red de acceso maneja 13 Kbit/s, y los canales del núcleo de red 64 Kbit/s. El acople de estos se hace en el BSC. El equipo de encriptación está normalmente localizado en las estaciones base.

**Figura 2.3. Arquitectura básica de una Red GSM.**



**\* Fuente: Understanding Telecommunications II. Ericsson, STF, Student literature.**

La conmutación se ejecuta en cuatro niveles de la estructura: en la BTS, BSC, MSC y GMSC. En la interfaz aire se efectúa la concentración debido a que el número de canales de tráfico es limitado. Esta concentración es controlada por BSC, el cual asigna los canales de tráfico disponibles a los móviles. Después se hace la desencriptación en la BTS, en donde los canales de tráfico de 13 Kbit/s son multiplexados en uno de 64 Kbit/s.

El BSC conecta los canales de tráfico entre la BTS y el MSC, empleando un juego de codificadores de voz que pueden ser conectados al conmutador en el BSC. El BSC también maneja la conmutación cuando el móvil se traslada de una celda a otra en el área de servicio del mismo, en el momento que se este realizando una llamada en progreso.

Normalmente, un MSC conmuta canales de tráfico de 64 Kbit/s entre un GMSC y uno de sus BSCs. El MSC debe ser capaz de identificar en cual sección de su área de servicio se encuentra una llamada en curso. También debe estar capacitado para la conmutación con otro MSC cuando un móvil se traslada de una celda que no esté ubicada en su área de servicio, en el momento en que se esté realizando una llamada.

Un GMSC conmuta canales de tráfico de 64 Kbit/s entre redes externas y los MSCs de su propia PLMN. Los GMSC son conectados a redes externas en niveles jerárquicos de redes nacionales e internacionales. Cuando un GMSC recibe una llamada de una red externa, debe determinar el MSC que esté habilitado actualmente para localizar el terminal móvil y conectarlo.

#### **2.4.2 TDMA (Time Division Multiple Access).**

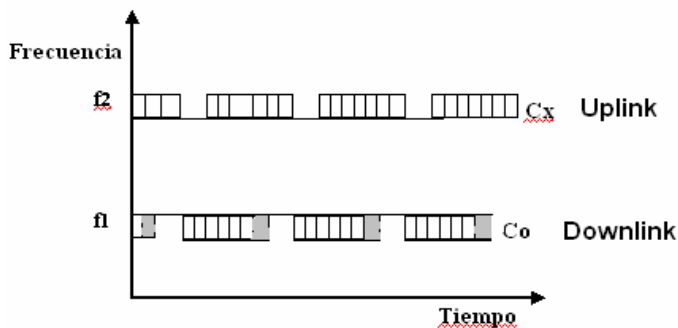
El esquema ilustrado en la Figura 2.4 combina TDMA y FDD, requiriendo de dos frecuencias para proveer una operación duplex, tal como en FDMA. El tiempo es dividido en *frames* y cada frame es además dividido en número de *slots* (cuatro en este caso). Para un móvil son reservados un par de *time slots*, uno en la frecuencia de subida (Uplink) y otro en la frecuencia de bajada (Downlink), escogidos de manera que no coincidan en el tiempo. Los espacios ocupados por el móvil para transmitir y recibir son de duración un poco menor a la del time slot para evitar interferencia entre usuarios. Este esquema tiene varias características:

- La transmisión y recepción nunca son simultáneas en el móvil, por lo cual no son necesarios los duplexores.
- Algunos bits se pierden debido al tiempo de guarda de inicio y final en el canal de usuario, necesarios entre espacios ocupados en cada time slot.

- El amplio ancho de banda del canal, necesario para acomodar a varios usuarios, conlleva a la necesidad de ecualización.
- El tiempo entre slots es habilitado para monitoreo de *handover* e intercambio de canales.
- EL receptor puede resincronizarse individualmente en cada espacio de tiempo ocupado.
- Diferentes tasas de bits pueden ser determinadas de manera flexible a los usuarios por asignación múltiple de time slots en un mismo instante.

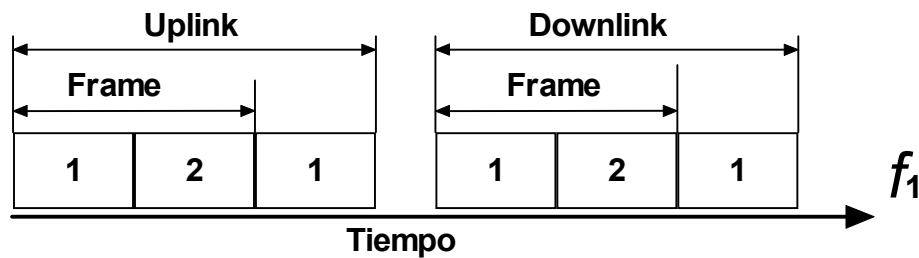
TDMA también puede ser usado con TDD, Figura 2.4 b) reservando la mitad de los time slots para el *uplink* y la otra mitad para el *downlink*, evitando la necesidad de conmutación de frecuencia entre la transmisión y la recepción, permitiendo además al canal de bajada ser estimado a partir del *downlink*, aún en la presencia de desvanecimiento por la dependencia en frecuencia.

**Figura 2.4. Principios del acceso TDMA. a) Utilizando FDD.**



a)

b) Utilizando TDD



b)

Este tipo de esquema no es el más eficiente ni el más sofisticado, pero es ampliamente utilizado en varios países, presentándose diferentes versiones dependiendo del fabricante, la banda de frecuencia y las necesidades del operador.

### **2.4.3 CDMA (Code Division Multiple Access).**

CDMA significa Acceso Múltiple por División de Código. En los sistemas CDMA todos los usuarios transmiten en el mismo ancho de banda simultáneamente. En esta técnica de transmisión, el espectro de frecuencias de una señal de datos es esparcido usando un código no relacionado con dicha señal, por lo tanto el ancho de banda es mayor.

En vez de utilizar las ranuras de tiempo o frecuencias, como lo hacen las tecnologías tradicionales, usa códigos matemáticos para transmitir y distinguir entre conversaciones inalámbricas múltiples. Los códigos usados para el esparcimiento tienen valores pequeños de correlación y son únicos para cada usuario. Esta es la razón por la que el receptor de un determinado transmisor, es capaz de seleccionar la señal deseada.

#### **• Esparcir el espectro**

Los errores introducidos por un canal ruidoso pueden reducirse a cualquier nivel deseado sin sacrificar la tasa de transferencia de información que utiliza. La ecuación Claude Shannon's describe la capacidad del canal:

**$C = W \log_2 (1 + S/N)$**  Donde:

**C** = capacidad de Canal en bits por segundo.

**W** = ancho de banda.

**S/N** = Energía por bit/ Noise potencia.

La razón S/N puede disminuirse sin reducir la tasa de error de bit. Esto significa que la señal puede esparcirse sobre un ancho de banda grande con los niveles menores de potencia fantasmal y todavía lograr la tasa informática requerida. Si la potencia total de señal se interpreta como la zona debajo la curva fantasmal de densidad, entonces señales con la potencia total equivalente pueden tener o una potencia grande de señal concentrada en un ancho de banda pequeño o una potencia pequeña de señal esparcida sobre un ancho de banda grande.

Una señal CDMA es creada para modular la señal de radiofrecuencia con una sucesión esparcida (un código que consiste de una serie de impulsos binarios) conocido como un pseudo-ruido (PN), esta es una secuencia de números con un periodo determinado. El PN de código se ejecuta a una tasa más alta que la señal RF y determina el ancho de banda real de transmisión.

Una señal en Espectro Disperso en Secuencia Directa (SS/DS) es obtenida modulando el mensaje con una señal pseudo-aleatoria de banda ancha (Código de Pseudo Ruido). El producto nos da una señal de banda ancha. Un código de pseudo ruido es una secuencia con valores -1 y 1 (polar) ó 0 y 1 (no polar) y posee propiedades similares a las del ruido. Esto determina valores pequeños de correlación entre los códigos y la dificultad de bloqueo o detección de una señal de información por un usuario no deseado. Las comunicaciones de banda angosta, ocasionan poca o ninguna interferencia en sistemas CDMA porque el receptor de correlación integra sobre un ancho de banda muy amplio.

Para mayor información respecto al sistema CDMA, referirse al capítulo 3, ya que este acceso múltiple es fundamental en el desarrollo de este proyecto.

## **2.5 TELEFONÍA MÓVIL EN COLOMBIA**

El sector de la telefonía celular en Colombia ha sido escenario de un proceso de consolidación entre empresas regionales y de la llegada de multinacionales de talla mundial, como lo son Bellsouth y América Móvil, que adquirieron la mayoría accionaria de los operadores inicialmente establecidos. Hasta 1999 el sector contaba con las seis empresas regionales a los que se le había otorgado licencias en 1994: los operadores de la Red A, Comcel, Ocel y Celcaribe; y los operadores de la Red B, Celumovil, Celumovil Costa y Cocolco. Celumovil y Comcel operaban en la región central, Ocel y Cocolco en la región oriental y Celumovil Costa y Celcaribe en la región caribe colombiana.

En la actualidad, el sector de las comunicaciones móviles en el país cuenta con el operador Bellsouth, con mayoría accionaria de la multinacional del mismo nombre, que surgió de la unión los antiguos operadores de la Red B, Celumovil, Celumovil Costa y Cocolco; el operador Comcel se unió con Ocel para conformar lo que es hoy el mayor operador del mercado colombiano con el 61% del total de suscriptores del sector y con cobertura en la región oriental y occidental, de propiedad mayoritaria de la holding mexicana América Móvil, y el operador de la costa norte colombiana Celcaribe, de propiedad mayoritaria de Millincom International Celular.

Además, en Octubre del 2003 entró en operación una nueva empresa que maneja los servicios de comunicación personal PCS, bajo la denominación de OLA, propiedad de la Empresa de Teléfonos de Bogotá (ETB) y las Empresas Públicas de Medellín (EPM) como accionistas aportando cada uno el 50 % de las inversiones totales.

La telefonía móvil en Colombia ha tenido un gran crecimiento influenciado por distintos factores y que actualmente obedece al mayor nivel de competencia que produjo en el mercado móvil del país la llegada de

Bellsouth y América Móvil y sobretodo la llegada del nuevo operador de PCS (sistema de comunicación personal) OLA que ha llegado al mercado con gran cantidad de opciones para el consumidor.

No obstante el crecimiento del sector en Colombia, éste es significativamente inferior al observado en el resto de los países de América Latina y aún a los promedios mundiales, mostrando un gran rezago del país con relación a la dinámica mundial de la industria. Para el 2001, América Latina contaba con 17 teléfonos por cada 100 habitantes y en el mundo esta tasa era de 15,5 teléfonos por 100 habitantes, 10 y 8 puntos porcentuales por encima de este registro en Colombia respectivamente, pues en ese año la densidad telefónica móvil en el país era de apenas 7.4%[18].

La diferencia entre la dinámica del mercado móvil en otras latitudes y el estancamiento registrado en Colombia en el pasado reciente está asociada, además de la crisis económica por la que atravesaba el país en ese entonces, al grado de competencia que existe en esos mercados en donde por lo menos tres operadores prestan el servicio actuando en competencia, mientras que en Colombia aún existía un duopolio nacional, hasta la llegada de los PCS en Octubre del 2003.

Según señala la UIT en uno de sus últimos informes sobre el Desarrollo de las Telecomunicaciones, al referirse al éxito observado en el mercado móvil en el mundo, la competencia ha estimulado el rápido crecimiento del sector de la telefonía móvil, lo cual se ha visto reflejado con la llegada de los PCS en Colombia y el crecimiento a las comunicaciones móviles que este sistema le ha dado al país. Además hay una relación directa entre el número de operadores y el crecimiento de la red, según resultado de análisis de lo acontecido en diversos lugares del mundo. Casi todos los países en vías de desarrollo que han optado por el rápido crecimiento de sus redes móviles lo han hecho estimulando la presencia de múltiples operadores.

### **2.5.1 Operadores de Telefonía Móvil en Colombia.**

- **COMCEL.**

COMCEL se ha consolidado como el operador celular líder del mercado colombiano con una participación del 60.9% de los suscriptores a nivel nacional y de un 57.1% de las llamadas procesadas en el segundo trimestre de 2002 según el informe del Ministerio de Comunicaciones.

Desde el momento en que la licitación fue adjudicada, COMCEL recibió asesoría de expertos Canadienses con el fin de capacitar y entrenar al personal colombiano en todos los frentes. Del mismo modo, instaló una red de capacidad digital en un 100%, haciendo uso del sistema D-AMPS con el método de acceso múltiple TDMA, la cual era compatible con la mayoría de los países de América, trabajando en la banda de 900MHz.

Actualmente COMCEL se encuentra con su nueva tecnología de telefonía móvil GSM 2.5G, (haciendo uso de la misma banda del espectro electromagnético -900MHz-) que cuenta además con las capacidades de GPRS (General Packet Radio Service) lo cual conduce a la prestación de nuevos y mejores servicios tales como: SMS con imágenes y sonidos, navegación en internet vía wap o por medio de un PC/portátil y transmisión de video a baja resolución.

- **BELLSOUTH.**

Los operadores de telefonía móvil celular de la Red B Celumovil, Celumovil Costa fueron adquiridos en su mayoría accionaria por la multinacional BELLSOUTH a finales del año 2000, y ésta junto con su socio local, el Grupo Empresarial Valores Bavaria S.A., compró el 100% de Cocolco

convirtiéndose, a partir del 15 de marzo del 2001, en la empresa que se conoce actualmente como BELLSOUTH.

Celumovil, Celumovil Costa y Cocolco implementaron una plataforma tecnológica digital bajo el estándar D-AMPS utilizando el método de acceso múltiple TDMA, trabajando en la banda de 900MHz. Cocolco además construyó su propia red de microondas que garantizó la mayor confiabilidad en el manejo exitoso de cualquier llamada.

En la actualidad, BELLSOUTH se encuentra en el proceso de introducción de su nueva tecnología de telefonía móvil celular CDMA2000, (haciendo uso de la banda del espectro electromagnético de 900MHz) que hace posible la prestación de nuevos y mejores servicios tales como: SMS con imágenes y sonidos, navegación en internet vía wap o por medio de un PC/portátil y transmisión de video a baja resolución.

- **OLA TELECOMUNICACIONES.**

Con el propósito de imprimirle mayor dinamismo al mercado de la telefonía móvil en Colombia, se presentó en la ciudad de Medellín al tercer operador de telefonía móvil en el país: el Sistema de Comunicación Personal (PCS), que inició operaciones en el mes de octubre de 2003.

Este nuevo servicio de comunicación móvil (PCS) es ofrecido por la empresa Ola Telecomunicaciones y para lo cual se implementó una infraestructura de red que funciona en todo el territorio nacional con tecnología 2.5G, bajo el estándar GSM funcionando en la banda del espectro electromagnético de 1900MHz, que permite servicios avanzados de voz, datos e imágenes.

### **3. ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO (CDMA)**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se expondrán los conceptos básicos del acceso múltiple por división de código (que es una técnica de espectro expandido) y se detallan algunas de las diferentes variantes de CDMA, se efectúa un análisis de capacidad e interferencia en sistemas celulares, se aborda el problema del control de potencia que es crítico en CDMA y se explican conceptos básicos de sectorización y Handover. En el anexo D se presenta un resumen del estándar CDMA 2000, implementado actualmente en Colombia por la empresa celular Bellsouth, el cual es utilizado para propósitos de esta investigación.

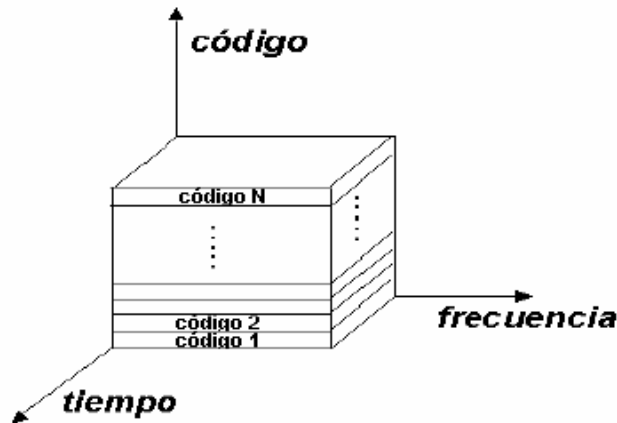
#### **3.2 DEFINICIÓN DE CDMA**

CDMA es una técnica de acceso múltiple que permite que varios usuarios puedan acceder a un mismo medio de comunicaciones. Todos los usuarios pueden utilizar un canal al mismo tiempo mediante la asignación de un código diferente para cada uno. Sin embargo, al utilizar el mismo canal en un instante determinado, cada usuario se vuelve interferente para los demás. Por esta razón, si el número de usuarios simultáneos no excede un cierto límite, es posible recuperar la información de cada uno. Pero si el número de usuarios excede el límite y la potencia recibida de señales interferentes es muy grande, entonces las señales no podrán ser recuperadas.

En CDMA es necesario que la señal que porta la información se haya expandido en frecuencia para lograr su distinción entre las demás. Utilizando el código asignado, el transmisor expande su señal en frecuencia mediante un codificador y la transmite al medio. El receptor, conociendo el código

utilizado por el transmisor, puede recuperar la señal mediante un decodificador y regresar la señal a banda base. El ancho de banda de la señal codificada debe ser mucho mayor que el de la señal que porta la información.

**Figura 3.1. Multiplexación por división de código**



**Fuente: Planificación y análisis de sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación sobre CellView.**

Debido al proceso de expansión de la señal, la modulación que utiliza esta técnica es llamada de espectro expandido o SS (spread spectrum). Por lo tanto CDMA es una técnica para señales en espectro expandido y sus variantes son conocidas como técnicas de acceso múltiple por espectro expandido o SSMA (Spread Spectrum Múltiple Access).

### **3.3 VARIANTES DE CDMA**

Al utilizar CDMA, el acceso al sistema se realiza por medio de códigos, todas las estaciones móviles que se encuentran en una celda y la estación base utilizan la misma frecuencia para transmitir señales (Lo contrario ocurre con FDMA, que utiliza bandas de frecuencia diferentes y TDMA que hace uso de ranuras de tiempo). Cada estación móvil tiene asignado un código único para

ayudar en la modulación y la demodulación de la señal en espectro expandido y como los códigos son distintos entre todos los móviles, la información puede ser descifrada sin problemas. El código puede emplearse de diferentes formas en el proceso de modulación y demodulación de la señal expandida en frecuencia. Siguiendo una clasificación basada en el tipo de modulación se tienen cuatro tipos de CDMA:

- 1) **FH-CDMA** (Frequency Hopping CDMA) o CDMA por saltos de frecuencia.
- 2) **TH-CDMA** (Time Hopping CDMA) o CDMA por saltos de tiempo.
- 3) **DS-CDMA** (Direct Sequence CDMA) o CDMA por secuencia directa.
- 4) **Hybrid CDMA o CDMA híbrido**, que son combinaciones de los tres tipos de CDMA estudiados en este capítulo.

A continuación se profundizará en cada aspecto.

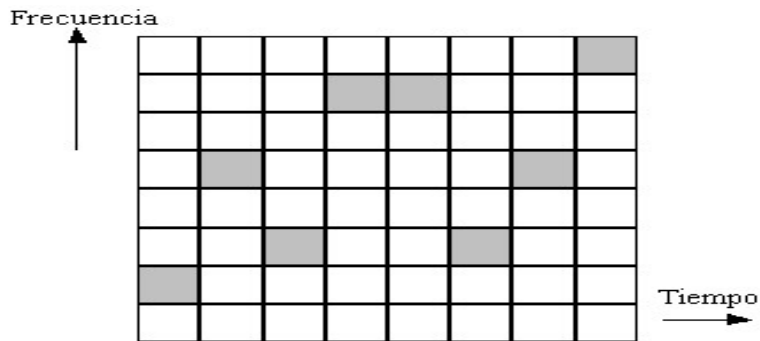
### **3.3.1. FH-CDMA**

Los saltos de frecuencia aleatorios para evitar la interferencia es el concepto básico que maneja FH-CDMA. Es necesario crear una secuencia no fija utilizando un código de forma pseudoaleatoria para generarla, por lo tanto nadie podrá adivinar la siguiente frecuencia porque la secuencia siempre será distinta logrando así que la transmisión se lleve a cabo exitosamente.

Varias transmisiones pueden llevarse a cabo si el patrón de elección de frecuencias está coordinado y nunca hay traslape de frecuencias en las diferentes secuencias. Esto puede lograrse utilizando códigos ortogonales pseudoaleatorios, en los cuales la autocorrelación es máxima para la misma secuencia y cero para diferentes secuencias. Las transmisiones pueden ser

exitosas ante ruido e interferencia si se eligen las frecuencias usando códigos ortogonales.

**Figura 3.2. Uso de espectro en FH-CDMA por un usuario**



Hay dos tipos de velocidad de elección de saltos de frecuencia en CDMA: rápido o fast frequency hopping (F-FH) y lento o slow frequency hopping (S-FH). En F-FH existen cambios múltiples de frecuencia durante la transmisión de un bit, por lo tanto cada bit es transmitido en diferentes bandas de frecuencia, lo que ayuda a contrarrestar el efecto de ruido selectivo de canal. Debido a que se utilizan diferentes códigos con buenas propiedades de correlación para elegir los diversos canales entre los usuarios, la probabilidad de colisiones es baja y la potencia recibida de la señal es lo suficientemente grande para recuperar la información.

En S-FH se transmiten varios bits utilizando la misma frecuencia pero también los códigos pseudoaleatorios dan aislamiento entre los diferentes usuarios y la comunicación puede llevarse a cabo exitosamente. El ancho de banda ocupado lo dictan dos señales distintas: para el caso de F-FH la señal que establece los cambios en frecuencia es la que determina el ancho de banda, en S-FH es la señal de información la que lo hace.

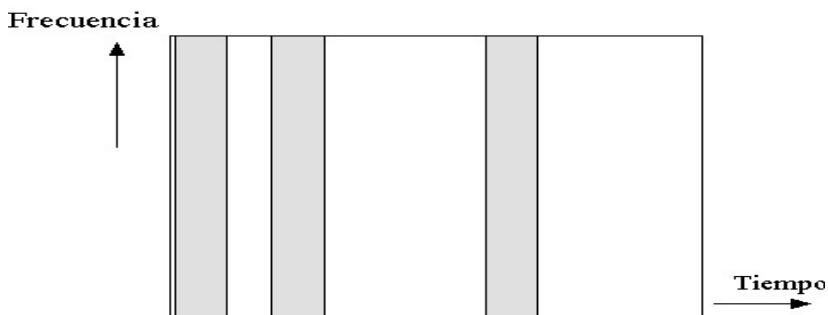
FH-CDMA es más robusto ante el desvanecimiento debido a efectos de multitrayectoria o multipatn fading porque permite eliminar la contribución de

componentes multitrayectoria que tienen un retraso (delay spread) mayor que el tiempo de cambio de frecuencia, de tal modo que cuando las componentes retrasadas llegan a la antena el receptor ya está sintonizado a otra frecuencia. El concepto de multicamino se profundizará en el capítulo 4.

### 3.3.2. TH-CDMA

También llamado time hopping o CDMA por saltos de tiempo. Time hopping se logra por medio de la compresión de la información y mandando ráfagas de bits en pequeños intervalos pero utilizando todo el espectro, para lograr así una gran velocidad. El inicio de cada ráfaga está determinado por un código pseudoaleatorio que se asigna a cada usuario, de tal modo que al codificar se eviten las colisiones.

**Figura 3.3. Uso del espectro en TH-CDMA por un usuario**



### 3.3.3. DS-CDMA

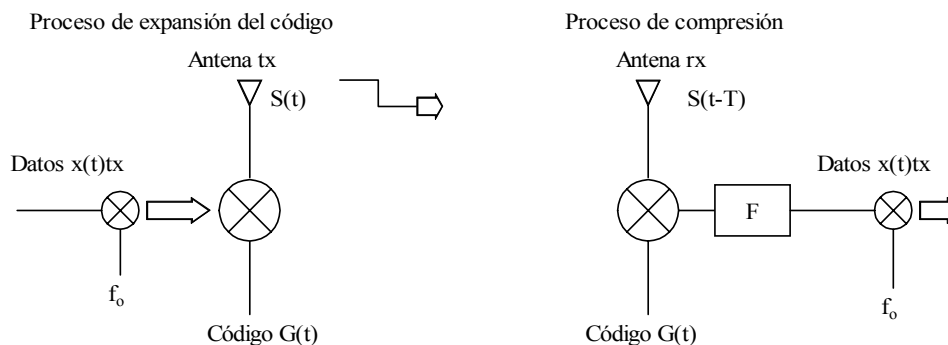
Las señales pueden transmitirse en la misma frecuencia, con el mismo ancho de banda y simultáneamente; la diferencia radica en la codificación de la información que porta cada una de ellas. Cada bit de información se representa por un símbolo que consiste en un largo número de bits codificados llamados chips, los cuales se obtienen utilizando las funciones de Walsh (ver tabla 3.1).

La información es codificada en diversas formas para aumentar la posibilidad de detección y corrección de errores. Después, la secuencia obtenida modula una señal portadora con una frecuencia, se emplea un código para expandir la señal que tendrá una velocidad, y se requerirá un cierto ancho de banda.

Los símbolos de código largo requieren mayor ancho de banda que la señal de información misma, es aquí donde se lleva a cabo la expansión en frecuencia. Los códigos de expansión son códigos de pseudoruido o PN (seudo-Noise) y se eligen debido a sus excelentes propiedades de autocorrelación, ortogonalidad y facilidad de generación (se utilizan registros de corrimiento y X-OR).

La señal transmitida es afectada por ruido e interferencia. Si el receptor conoce el código largo, puede comprimir la señal expandida utilizando un correlador y después filtrar la señal y demodularla en frecuencia para recuperar la información. El proceso básico de DS CDMA se muestra en la figura 3.4.

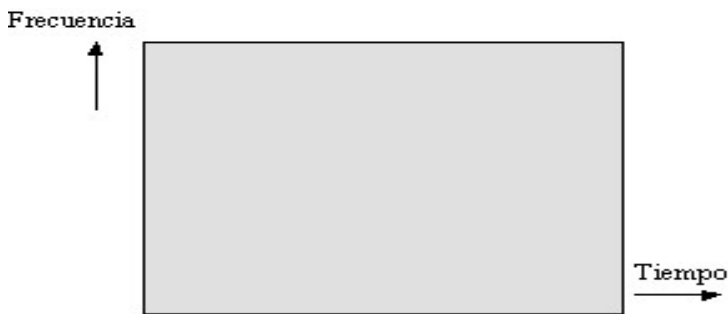
**Figura 3.4. Sistema DS- CDMA básico**





Las señales de los demás usuarios aparecen como ruido para la señal de interés, pues han sido generadas por distintos códigos de expansión. Al momento de contraer la señal en la recepción ese ruido permanecerá expandido y afectará mínimamente a la información (por las propiedades de ortogonalidad). El ruido selectivo de ancho de banda angosto afecta sólo una parte del espectro, por lo tanto su influencia también es mínima pues no afecta por entero la señal. En el caso de DS CDMA la señal de cada usuario utiliza todo el espectro de frecuencia, como se muestra en la figura 3.5.

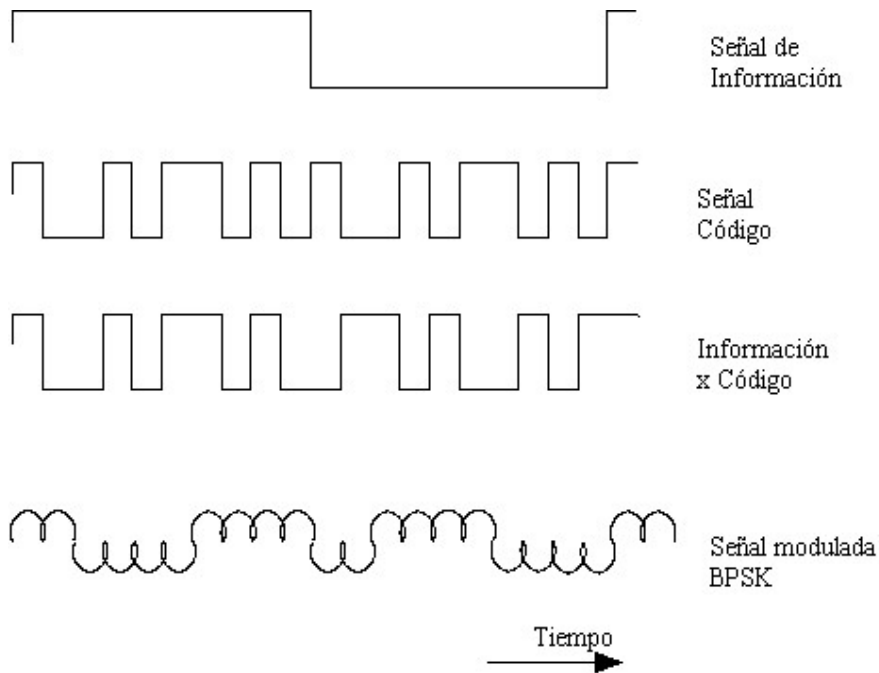
**Figura 3.5. Uso del espectro en DS-CDMA por un usuario**



- **Ganancia de procesamiento ( $G_p$ )**

En DS-CDMA, los datos son directamente modulados por una señal código digital y discretizada en tiempo y en nivel. La modulación de los datos es a menudo omitida, esto es, los datos son directamente multiplicados por la señal código y la señal resultante modulada por una portadora. De aquí el nombre que recibe la modulación. Se aprecia el proceso en la figura 3.6

**Figura 3.6. Proceso de ensanchado de la señal de datos**



La señal ensanchada por secuencia directa se consigue, multiplicando la señal de información modulada por una onda binaria en banda base, considerada aleatoria, con periodo de bit  $T_c$ , mucho menor que el período de bit  $T$  de la señal modulada. La señal ensanchada será:

$$S_i(t) = PN_i(t) \cdot A \cdot d(t) \cdot \cos(\omega_o \cdot t + \Phi) \quad (3.1)$$

donde:

- $d(t)=\pm 1$ : señal moduladora BPSK.
- $A$ : amplitud de la señal BPSK.
- $F$ : fase aleatoria.
- $Pni(t)$ : señal de pseudo-ruido (ensanchadora)

Como  $T_c$  (periodo de bit de la señal ensanchadora) es mucho menor que  $T$  (periodo de bit de la señal BPSK), podemos asumir que el ancho de banda de la señal ensanchada  $B_{ss}$  será igual al de la señal ensanchadora:

$$B_{SS} \approx \frac{1}{T_c}$$

con lo cual, la relación de ensanchamiento de la señal será:

$$\frac{B_{SS}}{B_s} \approx \frac{T}{T_c} = G_p$$

Donde  $B_s$  es el ancho de banda de la señal de información. A esta relación se la denomina ganancia de procesamiento.

Un receptor que quiera acceder a la información contenida en la señal ensanchada  $S_i(t)$  deberá conocer la secuencia de pseudo-ruido  $PN_i(t)$  y realizar la siguiente correlación:

$$\frac{2}{T} \cdot \int_0^T PN_i(t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \Phi) \cdot S_i(t) \cdot dt = A \cdot d(t) \quad (3.2)$$

para lo cual la señal  $PN_i(t)$  debe cumplir ciertas condiciones:

- el número de ceros y el número de unos deben diferir como máximo en una unidad.
- Una secuencia de  $r$  bits seguidos iguales debe producirse con una probabilidad  $2^{-r}$ .
- La autocorrelación de la secuencia  $PN_i(t)$  debe ser muy pequeña, salvo cuando el desplazamiento  $t$  es nulo:  $t=0$ .
- La correlación cruzada de dos secuencias  $PN_i(t)$   $PN_j(t)$  diferentes debe ser muy baja (secuencias cuasi-ortogonales).

Para la modulación de la señal ensanchada pueden utilizarse diversas técnicas de modulación, usualmente suelen usarse PSK, BPSK, D-BPSK, QPSK y MSK.

### **3.3.4. Sistemas híbridos CDMA**

Los sistemas híbridos incluyen cuatro posibles combinaciones de modulación: DS/FH, DS/TH, FH/TH y DS/FH/TH. En estos sistemas se intenta combinar las ventajas y combatir las desventajas de los esquemas aislados de CDMA. Por ejemplo, en DS/FH se busca combinar la característica de poco efecto de multitrayectoria de DS-CDMA con la favorable operación ante near-far interference de FH-CDMA (efecto de interferencia de un transmisor cercano a la antena receptora a uno lejano). En este sistema se codifica con un código la información y con otro código se eligen las frecuencias de transmisión. Ambos códigos están sincronizados en el tiempo mediante un reloj. Una descripción más detallada de las diferentes técnicas de CDMA puede hallarse en [44].

### **3.3.5. Características de DS-CDMA**

Centraremos nuestra atención en el espectro ensanchado por secuencia directa, que es el método empleado en CDMA 2000, utilizado por la empresa Bellsouth en Colombia y que es motivo de investigación en este proyecto. Para obtener mayor información, más adelante se resume el estándar CDMA 2000 (Ver anexo D).

#### **□ Acceso Múltiple**

Si múltiples usuarios usan el canal al mismo tiempo, habrá múltiples señales DS sobrepuestas en tiempo y frecuencia. En el receptor, el “desensanchado” es usado para eliminar el código ensanchador y recuperar la señal original. Esta operación concentra la potencia de la señal del usuario deseado en el ancho de banda de la información. Si la correlación cruzada entre el código del usuario deseado y el código de los usuarios interferentes es pequeña, la

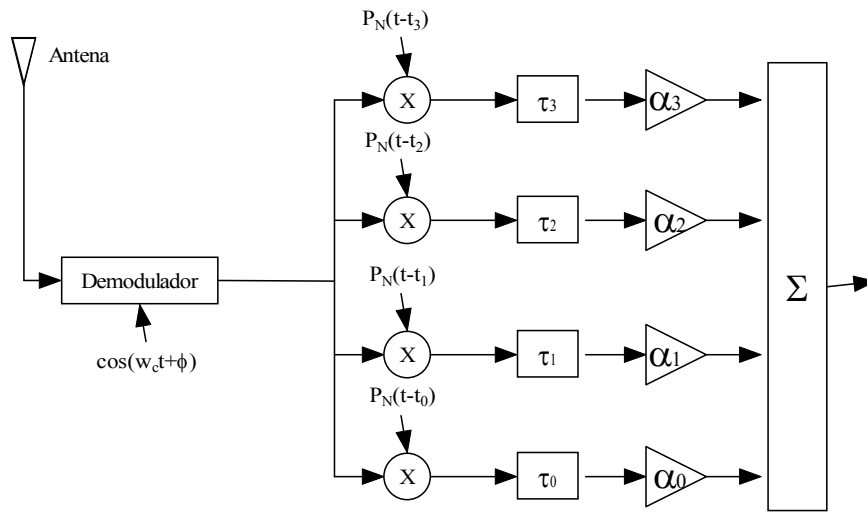
detección coherente situará únicamente una pequeña parte de potencia de las señales interferentes dentro del ancho de banda de la información.

#### □ **Protección frente a interferencia multicamino**

Una función de autocorrelación ideal, valdrá 0 fuera del intervalo  $[-T_c, T_c]$ , siendo  $T_c$  la duración del chip. Esto significa que si la señal deseada y una versión de ella misma retrasada más de  $2T_c$  son recibidas simultáneamente, el desensanchado actuará sobre la segunda de estas señales como si de una señal interferente se tratara.

En un canal multicamino, como lo es el canal móvil, la señal transmitida incide en numerosos obstáculos, los cuales producen alteraciones a la señal original, de modo que el receptor recibe varias copias de la señal original con distintos retardos y niveles medios de potencia. Si estas señales llegan separadas al menos la duración un chip del código el receptor puede distinguirlas. En este momento, desde el punto de vista multicamino, estas señales retardadas pueden ser consideradas como interferencia y por tanto suprimidas en el proceso de 'desensanchado'. Sin embargo se puede conseguir un beneficio aún mayor si en vez de descartar estas copias se las combina utilizando el receptor RAKE, ya que la forma de onda de CDMA facilita la utilización de la diversidad multicamino. El receptor RAKE consiste en un banco de correladores, cada uno de ellos recibe una señal multicamino. Después de 'desensanchar' la señal con los correladores, ésta es combinada. La mejora se obtiene debido a que el desvanecimiento sufrido por cada una de las señales multicamino es independiente del resto, ya que han seguido distinto camino desde el transmisor y el receptor. La siguiente figura ilustra el principio del receptor RAKE:

**Figura 3.7 Esquema del receptor rake de 4 ramas**



**Fuente: Planificación y análisis de sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación sobre CellView.**

Después de ensancharse y modularse la señal transmitida pasa a través de un canal multicamino, el cual se puede modelar como una etapa de retardo y un atenuador, independientes para cada uno de los caminos que siga la señal. El receptor RAKE tiene una rama, también llamada finger, para cada uno de esos caminos. En cada rama, la señal recibida es correlada por un código ensanchador, el cual está alineado en el tiempo con el retardo de la señal multicamino. Después de desensanchar las señales, éstas son amplificadas y combinadas.

En la figura se utiliza la combinación de máximo ratio. Debido al movimiento del móvil, el scattering del entorno varía y con él los retardos y atenuaciones del canal. Por ello es necesario medir los parámetros del canal y modificar las ramas del receptor RAKE si los cambios son significativos. Cambios de pequeña escala (menores que un chip de duración) son tomados en cuenta por un bucle de seguimiento de código, el cual sigue el retardo de cada una de las señales multicamino.

## □ Detección coherente

Implica una multiplicación de la señal recibida por el código generado localmente. Sin embargo, en el transmisor, multiplicar una señal de ancho de banda estrecho por un código de mayor ancho de banda hace ensanchar el espectro de la primera señal, de modo que su potencia dentro del ancho de banda de información se decremente por un factor igual a la ganancia de procesamiento.

### 3.4. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL SISTEMA DS-CDMA

A continuación se presentan las ventajas y desventajas principales en CDMA:

#### 3.4.1. Ventajas

- Reduce el efecto de desvanecimiento por multitrayectoria.
- Elimina la interferencia destructiva o jamming.
- Posee capacidad no rígida (no está limitada rigurosamente) debido a que sufre degradación paulatina por interferencia.
- Permite transferencia de llamadas suave entre celdas (soft handoff).
- Varias celdas atienden un mismo usuario (diversidad inherente).
- Utiliza eficientemente el espectro.
- Incrementa la capacidad del sistema hasta 4 veces comparado con TDMA y 20 veces con FDMA, según se afirma en [45] y [46].
- La velocidad de transmisión de canal es muy alta; mucho mayor que el inverso del 'delay spread', lo que hace innecesario el uso de ecualización.
- No se requieren bandas de tiempo para protección (como en TDMA).
- Permite una fácil transición de sistema analógico a digital.
- Puede coexistir con los sistemas ya instalados y puede hacerse una migración a largo plazo.

- La señal codificada se obtiene fácilmente. Es una simple multiplicación de señales.
- Sólo necesitamos una frecuencia portadora. Sintetizador sencillo.
- No es necesario la sincronización entre los usuarios del sistema.

### **3.4.2. Desventajas**

- Es muy complejo mantener la sincronización entre la señal recibida y el código generado localmente. Además, el error de sincronización debe ser muy pequeño, pues trabajamos a frecuencias de código muy altas (~3.15 MChips/seg.)
- La potencia recibida desde los usuarios cercanos a la estación base es mucho mayor que la recibida desde los usuarios más alejados por la estación base. Debido a que un usuario transmite continuamente en el ancho de banda completo, un usuario cercano a la estación base creará constantemente mucha interferencia para los usuarios más alejados, haciendo su recepción por la estación base imposible. Este efecto cerca-lejos puede ser resuelto aplicando algoritmos de control de potencia, de modo que todos los usuarios lleguen a la estación base con el mismo nivel medio de potencia. Sin embargo este control de potencia es bastante complejo, debido a retrasos de realimentación, estimaciones imperfectas de niveles de potencia, errores en el canal y condiciones de tráfico.

## **3.5. ANÁLISIS DE INTERFERENCIA EN UN SISTEMA DS-CDMA**

### **3.5.1. Análisis para el enlace directo**

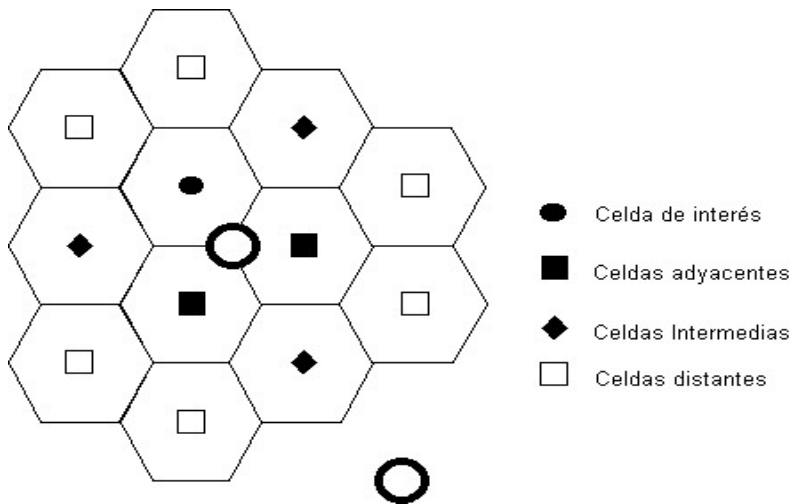
Entiéndase por enlace directo (forward link) el que enlaza a la estación base con la estación móvil. Cuando no se utiliza un esquema de control de potencia, considerando el peor caso para el enlace directo con once celdas

interferentes y M canales de tráfico y considerando solamente pérdidas por trayectoria, la razón portadora a interferencia C/I es:

$$\frac{C}{I} = \frac{\alpha R^{-\gamma}}{\left[ \alpha(M-1)R^{-\gamma} + \alpha(2M)R^{-\gamma} + \alpha(3M)*(2R)^{-\gamma} + \alpha(6M*(2.633R)^{-\gamma}) \right]} \quad (3.3)$$

Donde los términos en el denominador corresponden, a los M-1 interferentes dentro de la celda, a los 2M interferentes de las dos celdas más cercanas, a los 3M de las celdas intermedias y a los 6M grupos de las celdas más alejadas; R es el radio de la celda y  $\alpha$  es una constante de proporcionalidad. Para  $\gamma = 4$  (exponente de pérdidas que se asume para el análisis) el valor de la razón portadora a interferencia es  $C / I = 1 / (3.3123M-1)$ . Al sustituir el valor típico de  $C / I = -15$  dB, la ecuación anterior indica que pueden haber hasta 9.7 canales por celda.

**Figura 3.8. Interferencia debida a varias celdas en un sistema CDMA**



Si se adopta un esquema de control de potencia de tal forma que la interferencia de las otras celdas pueda despreciarse, entonces:

$$\frac{C}{I} = \frac{\alpha R^{-\gamma}}{\alpha(M-1) * (R^{-\gamma})} \quad (3.4)$$

por lo tanto  $\frac{C}{I} = \frac{1}{(M-1)}$  (3.5)

Sustituyendo valores típicos se obtiene un total de 30.25 canales por celda. Entonces, un control de potencia eficiente puede incrementar más de tres veces la capacidad del sistema, según se ve en [45] y [47].

En el enlace directo, al considerar un entorno de shadowing, puede verse que la capacidad es afectada fuertemente. El control de potencia reduce la interferencia entre celdas y ayuda a combatir el desvanecimiento lento (slow fading); lo cual ayuda a obtener mejores razones de señal a interferencia.

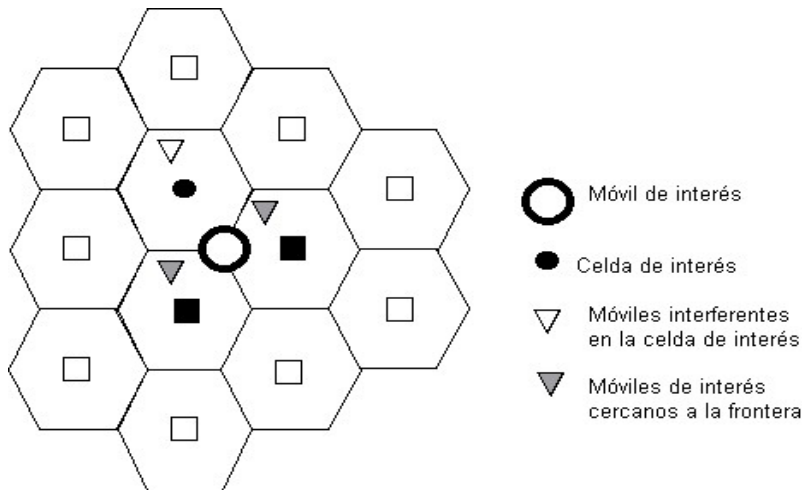
### 3.5.2. Análisis para el enlace inverso

En el enlace inverso, del móvil a la estación base, es necesario tener una recepción uniforme de la potencia de las señales provenientes de cada estación móvil dentro de la celda y así controlar la interferencia dentro de la celda. Un buen control de potencia debe minimizar el efecto de interferencia cercano a lejano, mantener una buena relación señal - interferencia dentro de la celda, ahorrar batería y compensar las pérdidas por propagación. El peor caso de interferencia para el enlace inverso ocurre cuando la estación móvil está en la frontera de la celda y varios móviles enlazados a las celdas adyacentes también están cercanos a la frontera. Si llamamos  $m_1$  al número de canales activos en la propia celda,  $m_2$  y  $m_3$  al número de canales activos de las celdas adyacentes, entonces la relación C/I será:

$$C/I = C / [(m_1 - 1) C + r_{12} m_2 C + r_{13} m_3 C] \quad (3.6)$$

$$C/I = 1/ [m_1 -1 + r_{12} m_2 + r_{13} m_3] \quad (3.7)$$

**Figura 3.9. Interferencia debida a varios móviles en un sistema CDMA**



de donde para el peor caso debe cumplirse que:

$$m_1 + r_{12} m_2 + r_{13} m_3 \leq I / C + 1 \quad (3.8)$$

Donde  $r_{12}$  y  $r_{13}$  son las porciones del total de canales de las celdas adyacentes que interfieren con la estación móvil de interés. Suponiendo que  $r_{12} = r_{13} = 1/6$  (es una suposición razonable si el sistema está bien diseñado), para un valor de  $C/I = -17$  dB se tendrá la relación:

$$m_1 + 0.166 (m_2 + m_3) \leq 51 \quad (3.9)$$

Lo cual limita el número de canales en el sistema. Se afirma que la capacidad del sistema utilizando valores típicos para los parámetros considerados es de 36 usuarios por sector en el enlace inverso y 38 en el enlace directo y que se mejora la capacidad respecto a los sistemas FDMA y TDMA. En [35] y [36] se detalla el desvanecimiento lento o Shadowing, soft handoff y sectorización, entre otros.

### **3.6. CONTROL DE POTENCIA**

El problema del control de potencia surge debido a la interferencia producida por el acceso múltiple. Todos los usuarios transmiten su señal utilizando el mismo ancho de banda durante el mismo intervalo de tiempo, con lo que los usuarios se interfieren unos a otros. Debido a los mecanismos de propagación, la señal recibida por la estación base procedente de un usuario cercano a la misma será mucho mayor que la señal recibida desde otro usuario situado en el borde de la cobertura ofrecida por esa estación base. Debido a esto el usuario alejado será dominado por el cercano (efecto Near-Far interference) [48].

Para conseguir una capacidad considerable, todas las señales deberían llegar a la estación base con el mismo nivel medio de potencia. En la estación base, el control de potencia define junto con los parámetros de las antenas y otras variables el área de cobertura. Este hecho permite controlar el funcionamiento del sistema por medio de la reducción o incremento de áreas para balancear la carga en horas pico y retardar handoffs.

La disminución de interferencia en un sistema CDMA debida al control de potencia tiene un fuerte impacto en la capacidad del sistema. Si se desea lograr una buena calidad en las señales transmitidas (calidad de voz o datos) y lograr la máxima capacidad del sistema, es necesario el control de potencia para combatir la pérdida por propagación y los efectos de desvanecimiento causados básicamente por el entorno físico y la velocidad del móvil.

#### **3.6.1. Control de potencia en el enlace inverso**

El problema del control de potencia en el canal inverso es de extremo interés en el diseño y operación de sistemas CDMA. La estación base tiene dos

formas de controlar la potencia de transmisión de la estación móvil. El control de potencia de lazo abierto ajusta la potencia de transmisión de acuerdo con la potencia de la señal recibida y compensa pérdidas por propagación y ensombrecimiento, el cual se realiza únicamente por la estación móvil. El control de potencia de lazo cerrado compensa el desvanecimiento rápido o de pequeña escala causado por el efecto de multitrayectoria en el ambiente. Este control lo realiza la estación base.

- **Control de potencia de lazo abierto.**

La estación móvil recibe una señal desde la estación base que sufre desvanecimientos y ensombrecimientos (fading y shadowing). La potencia de la señal varía con la distancia por las pérdidas debidas a la propagación. La estación móvil trata de compensar las pérdidas por propagación ajustando su potencia de transmisión conforme se desplaza. Si la potencia recibida de la señal de la estación base decrece con la distancia, la estación móvil debe incrementar su potencia de transmisión y viceversa.

Esta técnica compensa el desvanecimiento y el ensombrecimiento en forma inherente cuando se evalúa la potencia recibida, pues ha sufrido ambos efectos; y trata de compensar pérdidas simétricas o comunes a ambos canales, pero debido a que dichos enlaces están ubicados en distintas frecuencias las características de propagación y desvanecimiento son diferentes y persisten algunos errores. La componente de control de potencia de lazo abierto es por necesidad un proceso de filtrado de relativamente baja frecuencia; este proceso se realiza de la siguiente forma:

1. La estación móvil transmite su primera prueba en el canal de acceso después de que ha realizado la tarea de inicialización. Lee del canal de paging o de búsqueda los campos de potencia inicial INITPWR y de ajuste

NOMPWR (la nomenclatura corresponde a la del estándar IS 95 A [50]) y calcula su potencia de transmisión como:

$$P_0 \text{ (dBm)} = -P_i \text{ (dBm)} - 73 + \text{NOMPWR (dB)} + \text{INITPWR (dB)} \quad (3.10)$$

Donde  $P_i$  es la potencia media de recepción en la antena (o potencia de entrada) y  $P_0$  es la potencia media de salida, ambas en dBm. El término -73 dBm es definido como un factor de regreso, una estimación de la diferencia de niveles de potencia recibida entre el móvil y la estación base por tener diferentes potencias de transmisión.

2. La primera transmisión en el canal de reversa es

$$P_0 \text{ (dBm)} = -P_i \text{ (dBm)} - 73 + \text{NOMPWR (dB)} + \text{INITPWR (dB)} + \text{la suma de todas las correcciones en el canal de acceso}$$

3. La transmisión normal en el enlace inverso (de tráfico) es

$$P_0 \text{ (dBm)} = -P_i \text{ (dBm)} - 73 + \text{NOMPWR (dB)} + \text{INITPWR (dB)} + \text{la suma de todas las correcciones de lazo cerrado.}$$

El control de potencia de lazo abierto es el punto de partida para el esquema de lazo cerrado.

- **Control de potencia de lazo cerrado.**

Este esquema toma en cuenta las pérdidas asimétricas o no correlacionadas entre el enlace directo y el inverso debidas principalmente al desvanecimiento rápido Rayleigh/Rician y por diferencias en las ganancias de las antenas transmisora y receptora y sus pérdidas asociadas. La estación base monitorea la potencia de las señales recibidas de cada estación móvil en la celda y lo ajusta a un nivel específico por medio de un bit de potencia.

El bit de potencia es enviado en el canal directo (mediante inserción de bits extra entre frames; en una técnica llamada puncturing) e indica al móvil si debe incrementar o decrementar su potencia de transmisión. Hay un incremento o decremento fijo por cada bit de control, generalmente de 0.5 dB o 1dB. Este bit es enviado cada 1.25 ms (800 bps) en un subcanal de control.

En el control de potencia de lazo cerrado se divide en dos lazos diferentes: El lazo externo mantiene la calidad de la llamada cada 20 ms y el lazo interno se forma por el subcanal de control de potencia de 800 Hz mandando bits de potencia mediante símbolos puncturing en el canal directo. El rápido control de lazo cerrado resuelve el problema de near-far interference y mitiga en forma efectiva variaciones de potencia por desvanecimiento rápido a bajas velocidades.

### **3.6.2. Control de potencia en el enlace directo**

El control de potencia en el enlace directo puede determinarse por la distancia o por la razón portadora a interferencia C/I. En el esquema de control determinado por distancia se intenta que todos los móviles cercanos a la estación base reciban menor potencia que aquellos localizados lejos de la misma. El control de potencia determinado por la distancia es el más apropiado para ambientes sin ensombrecimiento donde la atenuación de potencia se debe principalmente por la distancia (por la pérdida de propagación). A fin de medir la distancia de cada móvil la estación base debe transmitir una señal piloto.

En el esquema de control de potencia determinado por C/I la relación señal a interferencia se minimiza de acuerdo con las necesidades específicas de cada usuario. Cada estación móvil manda información de su relación C/I a la estación base, entonces ésta decide si la potencia transmitida a dicho usuario debe ser incrementada o disminuida. La estación móvil mide la

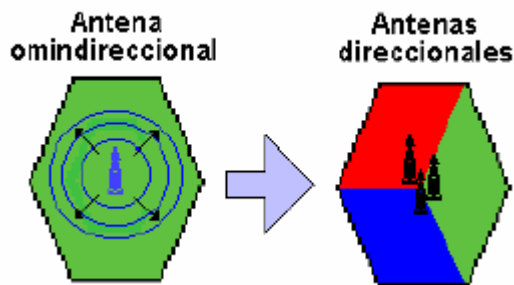
potencia de la señal recibida y genera un mensaje de reporte de medición de potencia o PMRM (Power Measurement Report Message) donde especifica el número de frames erróneos experimentados en una transmisión. Estos mensajes pueden ser solicitados por la estación base periódicamente o sólo cuando se rebasa un límite de error. Este tipo de control de potencia es lento comparado con el del canal inverso.

El control de potencia determinado por la razón C/I puede incrementar la capacidad del sistema de 1 usuario (sin control de potencia) a 38 usuarios en un ambiente de ensombrecimiento con una desviación estándar de 8 dB. El control determinado por la distancia no se utiliza en un entorno con shadowing, pero por otro lado con este esquema la capacidad del sistema se incrementa de 13 a 30 usuarios en un ambiente libre de ensombrecimiento.

### 3.7 SECTORIZACION

La sectorización trata de aumentar la capacidad del sistema a través de una reducción de las interferencias. Consiste en sustituir las antenas omnidireccionales de las estaciones base transmisoras por otras antenas con un diagrama tal que cada una radie en un sector específico de la célula sin proporcionar cobertura al resto. De esta forma, para dar cobertura a toda la célula se hará uso de varias antenas en el emplazamiento, de forma que cada una de ellas cubra un sector de la célula, como ilustra la figura 3.10.

**Figura 3.10 División de celdas por sectorización**



**Fuente: Planificación y análisis de sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación sobre CellView.**

La configuración más común suele ser la sectorización en 3 sectores (antenas con un ancho de haz de  $120^\circ$ ), aunque también es posible encontrar sectorizaciones de 6 sectores ( $60^\circ$ ). Al sectorizar en CDMA se reduce la interferencia cocanal (en CDMA todas las celdas tienen la misma frecuencia) que se produce en el sistema, tanto en el enlace ascendente como en el descendente. En la interferencia base-móviles, las antenas, al ser directivas, radian o interfieren sólo sobre aquellos sectores cocanal que caen dentro de su zona de apuntamiento. Por ello, un móvil sólo recibirá interferencias de las estaciones que lo rodean que lo tengan dentro de su zona de apuntamiento.

Para una sectorización de  $120^\circ$  sólo habrá dos estaciones de las tres vecinas que interfiera; para una sectorización de  $60^\circ$  habrá 1; etc. Del mismo modo, en la interferencia móviles-base, aunque los móviles transmiten omnidireccionalmente, las bases reciben sectorialmente y sólo se ven afectadas por móviles dentro de sectores cocanal que están dentro de la zona apuntada por la antena. Si la sectorización se realiza en sectores de  $120^\circ$ , la reducción de interferencia será de  $1/3$ ; con sectores de  $60^\circ$ , en  $1/6$ ; etc.

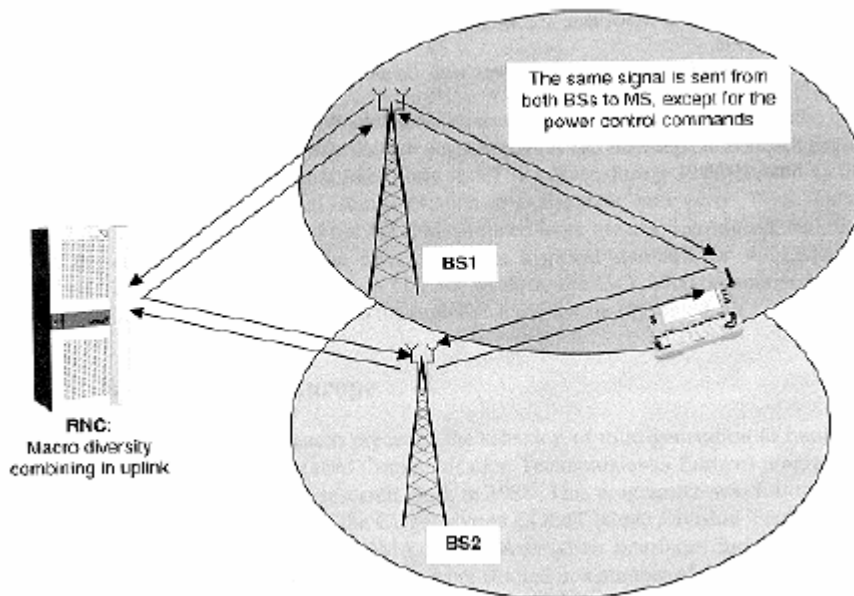
### **3.8 HANDOVER**

En CDMA se utiliza el handover dentro de la misma frecuencia. En este caso el móvil realiza de modo continuo un proceso similar al de búsqueda de celda servidora para conocer qué estaciones base recibe con más potencia. Si la señal recibida de alguna de las vecinas supera cierto umbral, la red ordena al móvil que la añada a su conjunto activo. A través de todas las estaciones base que pertenecen al conjunto activo se transmite la misma información de usuario. En CDMA existen dos casos posibles de handover:

### 3.8.1 Soft Handover

Una estación móvil está conectada a más de una estación base simultáneamente. Se utiliza para reducir la interferencia dentro de otras celdas y mejorar la implementación del sistema [49].

**Figura 3.11 Soft Handover en CDMA**



**Fuente: Holma, H., Toskala, A., "WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications", 2000**

En los sistemas FDMA o TDMA, celdas vecinas a otra celda no utilizan las mismas frecuencias que se usan en esa celda en concreto (existe una separación espacial entre celdas que usan las mismas frecuencias). Debido al modo de acceso de la tecnología CDMA, esta separación espacial no es necesaria, todas las celdas utilizan las mismas frecuencias para sus transmisiones, por tanto el factor de reutilización es igual a 1.

Los mecanismos de Handover permitirían siempre a la estación móvil conectarse a la celda de la cual recibiera con mayor nivel de señal. Debido a que en el soft handover la estación móvil está conectada a 2 o más

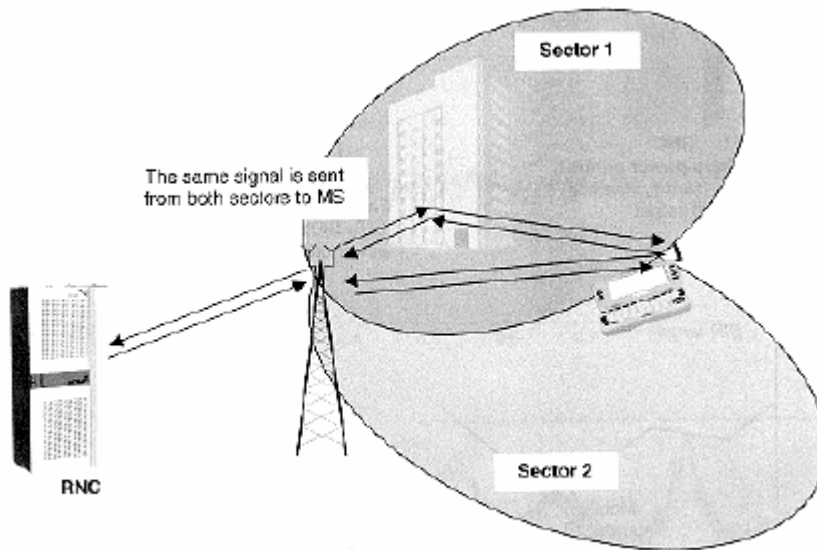
estaciones base, su potencia transmitida puede ser controlada dependiendo de la celda, de la cual la estación móvil reciba el mayor nivel de potencia. Una estación móvil entrará en el proceso de Soft Handover cuando el nivel de señal de las celdas exceda un cierto umbral pero esté todavía por debajo del nivel de señal de la celda actual.

En el enlace ascendente, 2 o más estaciones base pueden recibir la misma señal emitida por la estación móvil, ya que el factor de reuso es 1, las señales que llegan a las estaciones base son enrutadas hacia la RNC (Radio Network Controller), para que allí sean combinadas y se decida que estación base es la que tiene mejor nivel, tal y como mostraba la figura 3.12. En el enlace descendente la estación móvil puede combinar coherentemente la señal procedente de diferentes estaciones base tratándolas como componentes multicamino adicionales. Esto provee un beneficio adicional al sistema llamado macro-diversidad. La señal involucrada es combinada en el receptor RAKE del móvil para lograr más eficiencia y calidad en el servicio al usuario.

### **3.8.2 Softer Handover**

La estación móvil está conectada únicamente a una estación base, y se produce el traspaso de llamadas entre dos sectores de esa estación base. En la figura 3 se aprecia que la estación móvil dispone de dos canales para la comunicación con la estación base.

**Figura 3.12 Softer Handover en CDMA**



**Fuente: Holma, H., Toskala, A., “WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications”, 2000**

En el enlace ascendente se utilizan dos códigos pseudo-aleatorios, una en cada uno de los sectores, para que el terminal pueda distinguir ambos canales, y sepa de cual de los dos sectores recibe un mayor nivel de señal. Para obtener la información, el terminal actúa como ante el efecto multicamino. Cada señal es llevada a una rama distinta del receptor RAKE, pero en este caso, cada rama utilizará un código de desensanchado distinto. En el enlace ascendente, las señales recibidas por la estación base son llevadas al mismo receptor RAKE de banda base y combinadas como en el funcionamiento normal.

## **4. RADIOPROPAGACIÓN**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Antes de presentar los parámetros que determinan la radio propagación en los sistemas de comunicaciones móviles con tecnología CDMA, es necesario analizar las diferentes condiciones de propagación ocasionadas por las características propias del entorno tales como: terreno plano, terreno irregular, propagación a lo largo de las calles en condiciones de línea de vista (LOS), propagación en áreas edificadas con cruces de calles distribuidos regularmente en condiciones en las que no existe línea de vista (NOLS), terreno irregular edificado, hasta llegar a la propagación en ambiente urbano con edificios distribuidos irregularmente ubicados sobre terreno rugoso.

### **4.2 PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA SOBRE TERRENO PLANO.**

#### **4.2.1 Reflexión sobre terreno Plano.**

Es el caso más simple de propagación de ondas de radio sobre la tierra, para lo cual se presume que la superficie terrestre es un medio plano y perfectamente conductor. La primera suposición (medio plano) es válida sólo para enlaces de radio alejados una distancia de entre 10 y 20 Kilómetros [29]. La segunda condición (medio perfectamente conductor) puede ser satisfecha sólo en algunos casos especiales porque la relación entre la conductividad y la frecuencia debida a la permitividad del suelo, y la conductividad finita del subsuelo juegan un papel importante en altas frecuencias tales como las utilizadas para los sistemas de comunicación celular (banda UHF) [30]. Y tal como se comprobó con un estudio de propagación en banda angosta en TDMA desarrollado en [28].

### Teorema estricto de reflexión.

Para un medio perfectamente conductor, el vector de campo eléctrico total es igual a cero ( $\mathbf{E} = 0$ ) por lo cual la componente tangencial del campo eléctrico es:

$$E_{\tau} = 0$$

Consecuentemente, de las ecuaciones de Maxwell,  $\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = i\omega\mathbf{H}(\mathbf{r})$ . En un medio perfectamente plano la componente normal del campo magnético es:

$$H_n = 0$$

Considerando nuevamente las ecuaciones de Maxwell y mediante la introducción de coordenadas cartesianas, las condiciones de borde para la superficie de la tierra perfectamente conductora son:

$$E_x(x,y,z=0) = E_y(x,y,z=0) = H_z(x,y,z=0) = 0$$

Para obtener una solución de las ecuaciones de onda que describen la propagación de radio sobre terreno perfectamente conductor, se utiliza el principio de que una fuente de ondas electromagnéticas puede ser presentada como una superposición de fuentes puntuales, por lo tanto se reemplaza la antena transmisora por dos dipolos elementales y se realiza el análisis matemático de las ecuaciones de Maxwell, con lo cual se llega al siguiente resultado. Mayores detalles se exponen en Radio Propagation in Cellular Networks [12].

$$H_x(r) = \int_V [\nabla_x j]_x \cdot \frac{e^{ikr}}{r} d^3 r' + \int_V [\nabla_x j]_x \cdot \frac{e^{ikr_1}}{r_1} d^3 r'$$

$$H_y(r) = \int_V [\nabla_x j]_y \cdot \frac{e^{ikr}}{r} d^3 r' + \int_V [\nabla_x j]_y \cdot \frac{e^{ikr_1}}{r_1} d^3 r'$$

$$H_z(r) = \int_V [\nabla_x j]_z \cdot \frac{e^{ikr}}{r} d^3 r' + \int_V [\nabla_x j]_z \cdot \frac{e^{ikr_1}}{r_1} d^3 r'$$

donde,

$H_x, H_y, H_z$  = Componentes del campo magnético en las direcciones x, y, z respectivamente.

$\mathbf{j}$  = densidad de corriente.

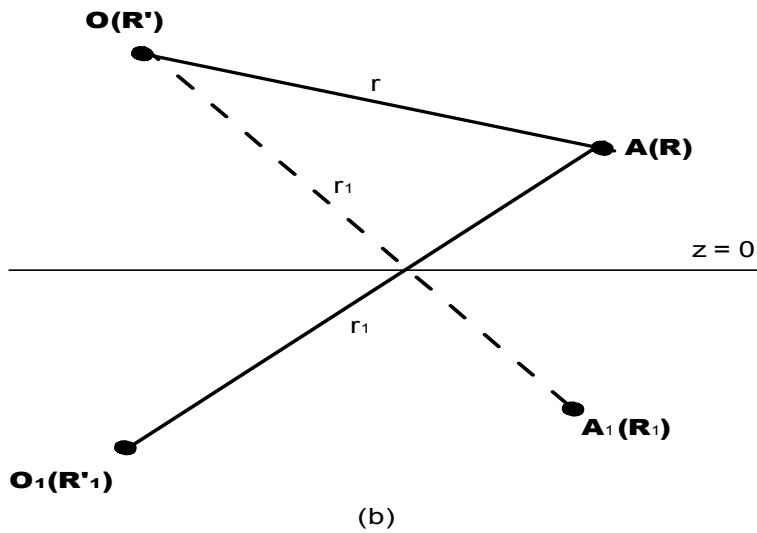
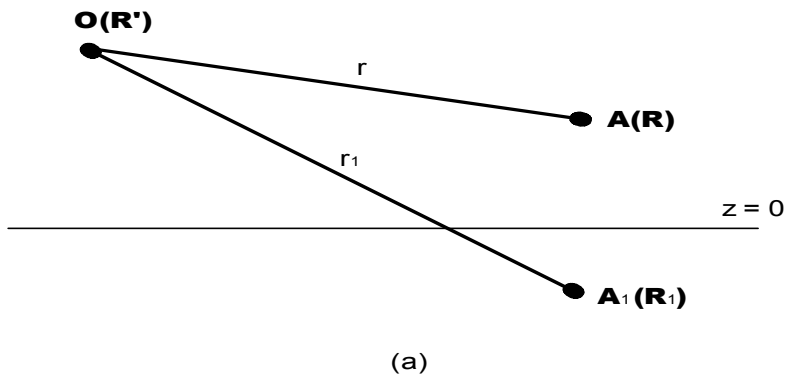
$r$  = distancia entre la fuente puntual y el observador.

$r_1$  = distancia entre la imagen de la fuente puntual y el observador.

Las componentes de campo Eléctrico pueden obtenerse a partir de una simple operación de divergencia con las componentes del campo Magnético.

Las ecuaciones anteriores describen el resultado físico; el primer término proporciona el campo que satisface la solución de la ecuación de onda para un medio atmosférico infinito sin tener en cuenta la superficie de la tierra y el segundo término describe el efecto de la influencia de la superficie de la tierra. Por lo tanto, el efecto de una superficie plana se puede resumir en la sumatoria entre el campo directo y el campo reflejado desde la misma.

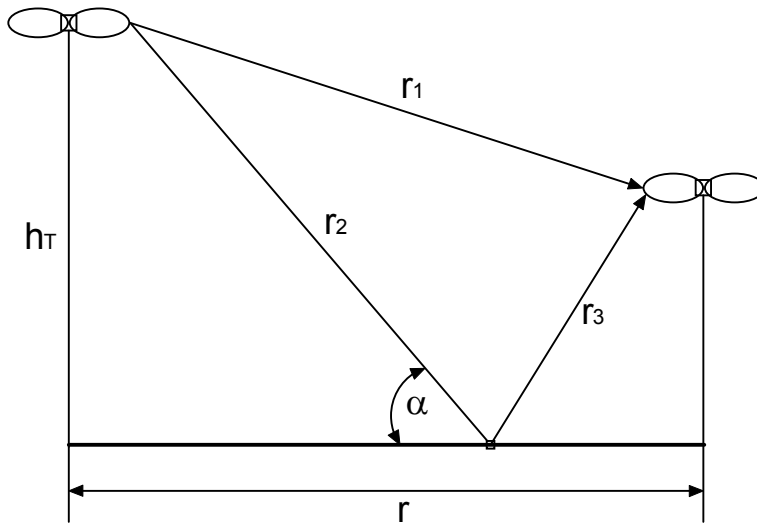
**Figura 4.1: Representación Geométrica del efecto de una fuente imaginaria debido a la reflexión sobre terreno plano.**



#### **4.2.2 Modelo de dos rayos.**

El modelo de dos rayos fue propuesto para describir el proceso de propagación de las ondas electromagnéticas sobre terreno plano. Usando este modelo algunos autores [28], [31], [32], han establecido las fórmulas básicas de pérdidas por trayectoria y atenuación de la intensidad de campo.

**Figura 4.2: Geometría del modelo de dos rayos.**



Considerando el modelo de dos rayos mostrado en la figura 4.2, el cual se basa en la superposición de un rayo directo desde la fuente, y un rayo reflejado desde la superficie plana de la tierra, se presenta la intensidad de campo total como [12]:

$$E_R = E_T \left( 1 + \frac{r_1}{r_2 + r_3} \Gamma(\Psi) e^{-jk\Delta r} \right)$$

donde;

$r_1$  = Camino del rayo directo (figura 4.2)

$r_2+r_3$  = Camino del rayo reflejado.

$\Delta r = (r_2+r_3) - r_1$  = diferencia en el camino de radio de las dos ondas.

$\Gamma(\Psi)$  = coeficiente de reflexión para polarización vertical y horizontal [12].

$E_T$  = Intensidad de campo transmitida.

$E_R$  = Intensidad de campo en el receptor.

De acuerdo a las anteriores consideraciones, se puede definir las pérdidas por trayectoria (path loss en dB) de la siguiente forma:

$$L = 20 \log |E_T| + 20 \log \left| 1 + \frac{r_1}{r_2 + r_3} \Gamma(\Psi) e^{-jk\Delta r} \right|$$

lo que es equivalente a:

$$L = L_b + 20 \log \left( \frac{r}{r_b} \right) \quad r \leq r_b$$

$$L = L_b + 40 \log \left( \frac{r}{r_b} \right), \quad r > r_b$$

donde;

$r_b$  = rango crítico, definido como la distancia máxima desde el transmisor a la cual existe un máximo de potencia recibida y es igual a  $4h_r h_T / \lambda$ .

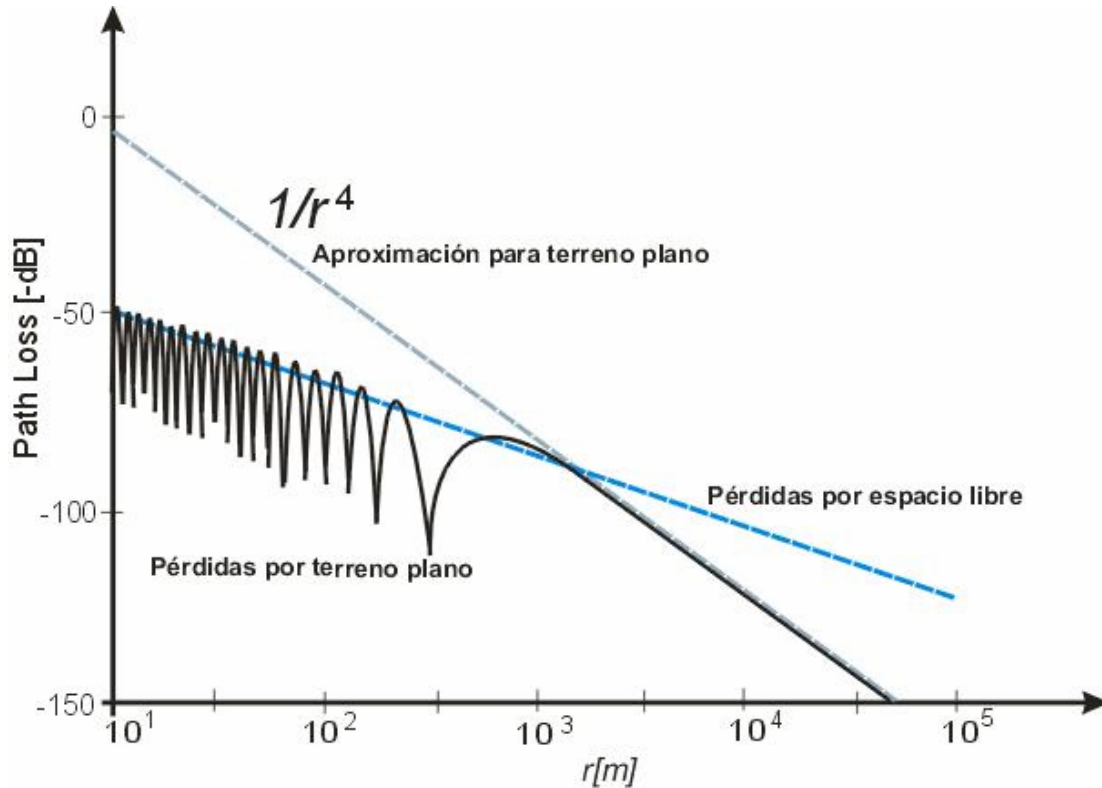
$r$  = distancia entre el transmisor y el receptor.

$L_b$  = es el Path loss en el espacio libre a una distancia entre el transmisor y receptor igual al rango crítico, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$L_b = 32.44 + 20 \log r_{b[km]} + 20 \log f_{[MHz]}$$

En la figura 4.3 se puede observar la característica de pérdidas por trayectoria (path loss) para terreno plano y el espacio libre, visualizando la relación con la aproximación general realizada para la predicción del path loss en terreno plano.

**Figura 4.3: Característica de radio propagación para terreno plano vs. Espacio libre.**



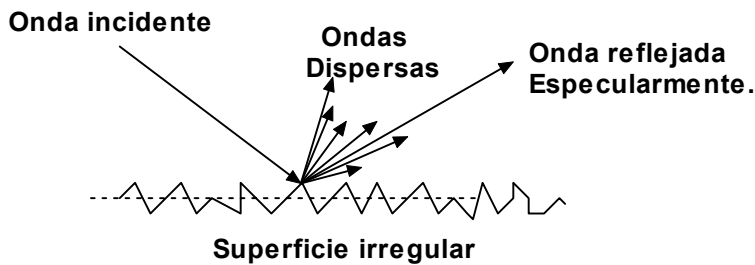
### **4.3 PROPAGACIÓN DE RADIO ONDAS SOBRE TERRENO IRREGULAR.**

#### **4.3.1 Propagación sobre terreno rugoso en condiciones de línea de vista (LOS) entre las Antenas.**

En condiciones de visibilidad directa entre el transmisor y receptor (LOS) ubicados sobre terreno rugoso, el campo total es la superposición de la onda directa, la onda reflejada especularmente desde la superficie y las ondas dispersas en todas las direcciones desde las irregularidades del terreno, tal como se aprecia en la figura 4.4. Para predecir las características de pérdidas por propagación sobre terreno irregular, y para estimar el aporte de cada onda al campo total, es necesario obtener algunos criterios acerca de la

rugosidad de la superficie los cuales son presentados en algunas referencias [29],[30],[12].

**Figura 4.4 Reflexión sobre una superficie de terreno irregular.**



- **Características del campo en condiciones de línea de vista sobre una superficie rugosa.**

Como se había mencionado anteriormente, en este caso el campo total consta de la componente reflejada especularmente, la componente directa y la componente de dispersión, la cual es introducida debido a las imperfecciones del terreno. La componente de campo especular corresponde a la parte coherente de la intensidad de campo total y es igual al cuadrado del campo promedio el cual es el resultado del campo directo y el reflejado. La componente de dispersión corresponde a la parte no coherente de la intensidad de campo total la cual es causada por la rugosidad de la superficie. Si la superficie es muy rugosa, la componente especular (parte coherente) del campo total desaparece casi completamente y la componente de dispersión domina el campo total.

En la actualidad se han desarrollado dos aproximaciones generales para solucionar los problemas de dispersión de ondas ocasionados por las rugosidades de la superficie, a saber: Técnica de perturbación [33], que se aplica a las superficies que son escasamente rugosas y para las cuales la pendiente de la superficie es más pequeña que la unidad; y la técnica de la

aproximación de Kirchhoff [34], la cual es aplicable a superficies cuyo radio de curvatura de las rugosidades del terreno es mucho más grande que la longitud de onda, tal como se observa en la figura 4.5.

A continuación se presenta el resultado de la intensidad de campo eléctrico para el caso en que las rugosidades del terreno tienen una altura considerable y la superficie tiene conductividad y permitividad dieléctrica arbitraria, un análisis más detallado se puede encontrar en [12], la cual es:

$$E(k, k_\zeta) \approx \frac{e^{ik(R_{10}+R_{20})}}{4\pi i R_{10} R_{20}} \frac{q^2}{q_z} E_r \int_{S_0} \exp\{-i[q \cdot r + q_z \zeta(r)]\} dr$$

donde;

$R_{10}$  y  $R_{20}$  = son las distancias entre el punto arbitrario  $r(x,y,z=0)$  sobre la superficie  $S_0$ , la cual es la proyección de la superficie rugosa  $S$  en el plano  $z=0$ , y la fuente  $O$  y el punto observado  $R$  respectivamente.

$$q = k_\zeta - k$$

$$k = \mathbf{ka} = k \nabla_r R_1$$

$$k_\zeta = \mathbf{kb} = -k \nabla_r R_2$$

$\zeta(r)$  = Función que describe la altura de la rugosidad de la superficie.

$r$  = punto de análisis ubicado sobre la superficie  $S$ .

$E_r$  = componente del campo reflejado

Figura 4.5: Presentación de la aproximación de Kirchhoff para terreno liso.

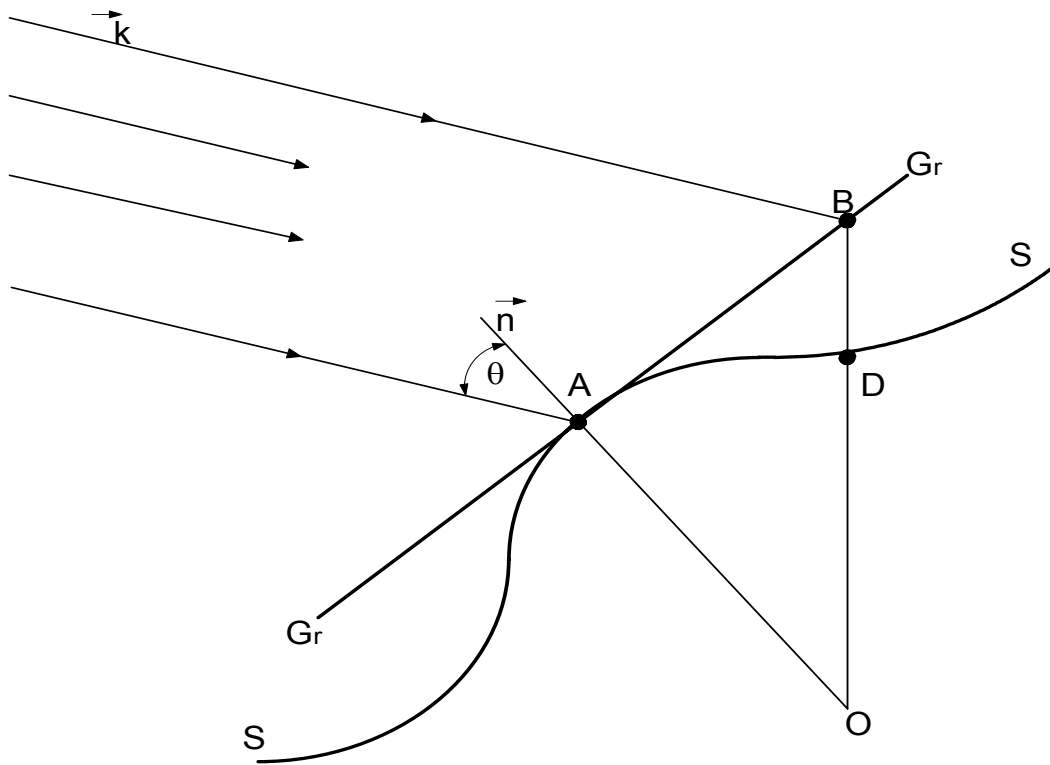
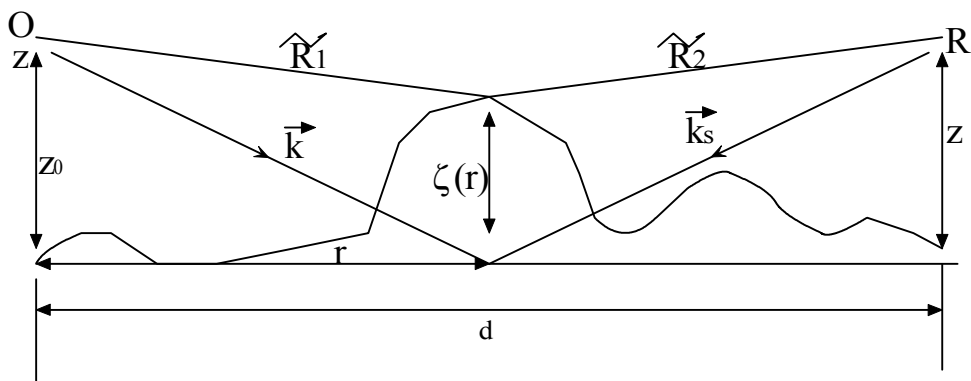


Figura 4.6: Geometría de reflexión de la superficie casi lisa.



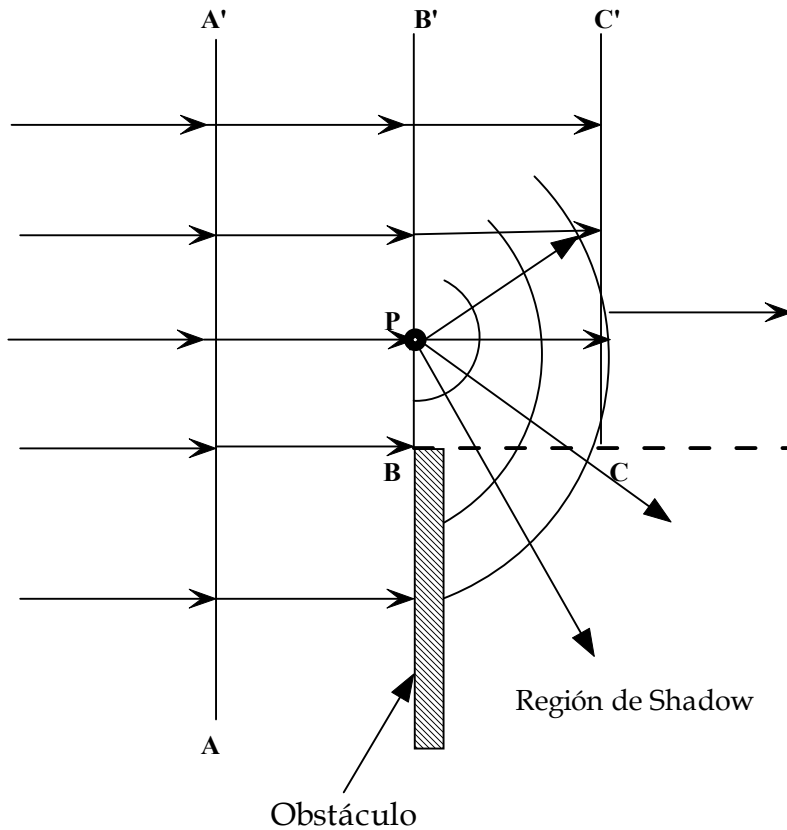
#### **4.3.2 Propagación sobre terreno rugoso en condiciones sin línea de vista (NLOS) entre las antenas.**

En el caso en que se encuentra un obstáculo (árboles, montañas, etc) entre la línea de vista de las dos antenas, transmisor y receptor, se presenta el fenómeno de la difracción que está basado en el principio de Huygens [12], [35]. Generalmente se consideran dos situaciones: propagación sobre un solo obstáculo, y propagación sobre múltiples obstrucciones sobre terreno rugoso.

- **Propagación sobre un solo borde de cuchillo.**

Cuando hay presencia de un obstáculo entre las dos antenas, se puede modelar como un borde de cuchillo, el cual indica que entre el transmisor y el receptor sólo existe un semi-frente de onda, como se muestra en la figura 4.7. Se establece según la teoría clásica de rayos ópticos que no existe campo electromagnético en la región de sombra, sin embargo según el principio de Huygens, las ondas originadas en cada punto del frente de onda inicial se propagan en dicha región. Este fenómeno se conoce como difracción.

**Figura 4.7: Difracción por un borde de una obstrucción.**



**Pérdidas por difracción.**

Cuando hay presencia de un obstáculo entre el transmisor y el receptor existen pérdidas por difracción. Estas pérdidas pueden obtenerse haciendo uso del cálculo de las integrales complejas de Fresnel [2] y el principio de Huygens [12], mediante lo cual se puede establecer que el campo eléctrico total después de la difracción es:

$$E_{total} = E_i * D * \exp\{j\Delta\Phi\}$$

donde,

$E_i$  = campo eléctrico de la onda incidente.

$D$  = Coeficiente de difracción.

$\Delta\Phi$  = diferencia de fase entre las onda difractada y la onda directa.



donde,

$$C(v) = \int_0^v \cos\left\{-\frac{\Pi}{2}t^2\right\} dt$$

$$S(v) = \int_0^v \text{sen}\left\{-\frac{\Pi}{2}t^2\right\} dt$$

Haciendo uso del modelo empírico de Lee [36] para obtener las pérdidas por difracción por filos de cuchillo, se tiene que:

$$L(v) = L_T^{(0)} = 0 \text{ (dB)}, \quad v \leq -1$$

$$L(v) = L_T^{(1)} = 20 \log(0.5 - 0.62 * v) \text{ (dB)}, \quad -0.8 < v < 0$$

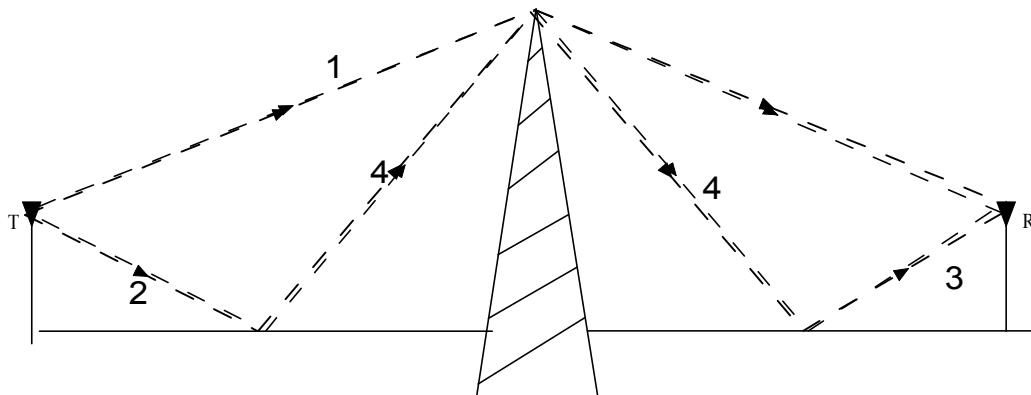
$$L(v) = L_T^{(2)} = 20 \log\{0.5 * \exp(-0.95 * v)\} \text{ (dB)}, \quad 0 < v < 1$$

$$L(v) = L_T^{(3)} = 20 \log\left\{0.4 - \left(0.1184 - (0.38 - 0.1 * v)^2\right)^{1/2}\right\} \text{ (dB)}, \quad 1 < v < 2.4$$

$$L(v) = L_T^{(4)} = 20 \log\left(\frac{0.225}{v}\right) \text{ (dB)}, \quad v > 2.4$$

En el caso en que se trabaje con el signo negativo en el parámetro de Fresnel - Kirchhoff, se introduce en las fórmulas anteriores  $-v$  en vez de  $v$  [12], Además el modelo de Lee se puede aproximar para tener en cuenta las reflexiones en la tierra, como se muestra en la figura 4.9.

**Figura 4.9: Difracción por un filo de cuchillo con reflexión de tierra.**



Aquí se muestran cuatro rayos con sus propios caminos; el primero sufre solamente difracción por el filo de cuchillo, el segundo y el tercero experimentan difracción y una sola reflexión, y el cuarto sufre difracción y dos

reflexiones. Debido a que todos los rayos tienen diferentes caminos, todos llegan al receptor con diferentes fases, por consiguiente, para cada uno el parámetro de Fresnel – Kirchhoff es diferente, por lo tanto el campo total debe ser calculado de acuerdo a:

$$E = E_0 \sum_{k=1}^4 L(v_k) * \exp[j\Delta\Phi_k]$$

donde,

$\Delta\Phi_k$  = diferencia de fase del rayo k.

$L(v_k)$  = pérdidas por difracción del rayo k.

Considerando una situación real, las colinas no pueden ser representadas por filos de cuchillo debido a que la cima tiene dimensiones mucho más grandes que la longitud de onda de la onda transmitida, por lo tanto, las pérdidas por difracción exceden las pérdidas calculadas por la aproximación de filo de de cuchillo. Hacking [37] proponen reemplazar la cima redondeada de las colinas por cilindros de radio r igual a la cresta, debido a esto en cada borde del cilindro se experimenta una reflexión y por lo tanto las pérdidas aumentan. El exceso de pérdidas puede ser adicionado a las pérdidas por filo de cuchillo como [38]:

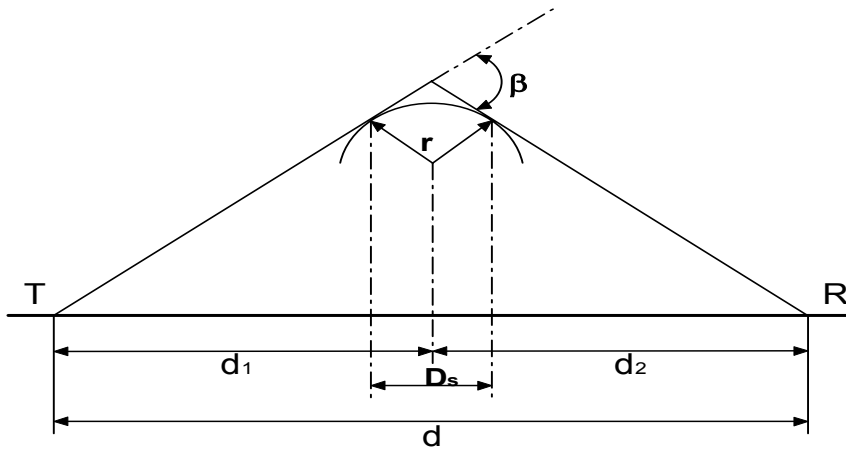
$$L_{ex} = 11.7 * \left( \frac{\Pi * r}{\lambda} \right)^{1/2} * \alpha, \quad \alpha = v * \left[ \frac{\lambda(d_1 + d_2)}{2 * d_1 * d_2} \right]^{1/2}$$

Por lo tanto el radio de la cima de la montaña puede ser encontrado como:

$$r = \frac{2 * D_s * d_1 * d_2}{\alpha * (d_1^2 + d_2^2)}$$

En la figura 4.10 se muestra esta aproximación.

**Figura 4.10: Difracción sobre un objeto redondeado.**



- **Propagación sobre múltiples obstrucciones en presencia de terreno rugoso.**

El cálculo de las pérdidas ocasionadas por múltiples obstáculos ubicados entre el transmisor y el receptor es un proceso complicado matemática y físicamente, pero puede ser reducido a la solución de múltiples integrales de Fresnel sobre cada obstrucción modelada como un filo de cuchillo. Existen diferentes modelos determinísticos, empíricos y semi-empíricos para el cálculo de las pérdidas ocasionadas por múltiples difracciones sobre dichos obstáculos. [2], [29].

Considerando el modelo determinístico de Vogler [12] que tiene en cuenta la difracción por múltiples filos de cuchillo, se puede llegar a determinar la función de atenuación después que la onda sufre difracción N-veces debida a N filos de cuchillo como:

$$A = \left(\frac{1}{2}\right)^N C_N \exp(\sigma_N) \left(\frac{2}{\pi^{1/2}}\right) \sum_{m=1}^{\infty} I_m$$

Donde:

$$I_m = 2^m \sum \alpha_1^{m_0 - m_1} \cdot I(m_0 - m_1, \beta_1) \cdot C(2, m_1, m_0)$$

$$C_N = \left[ \frac{r_1 \cdot r_2 \cdots r_N \cdot r_{tot}}{(r_1 + r_2)(r_2 + r_3) \cdots (r_N + r_{N+1})} \right]^{1/2} \quad \text{Para } N \geq 2$$

$r_{tot} = r_1 + r_2 + r_3 + \cdots + r_{N+1}$  y  $r_1, r_2, \dots, r_n$  son las distancias entre los filos de cuchillo 1, 2 ... N respectivamente.

Para resolver estas ecuaciones se pueden utilizar las siguientes relaciones recursivas:

$$C(N-L, j, k) = \sum_{i=0}^j \left\{ \frac{(k-i)!}{(j-i)!} \right\} \cdot \alpha_{N-L}^{j-i} \cdot I(k-i, \beta_{N-L}) \cdot C(N-L+1, i, j)$$

con  $i = m_{N-L}, j = m_{N-L-1}, k = m_{N-L-2}$ ,

$$2 \leq L \leq N-2, N \geq 4$$

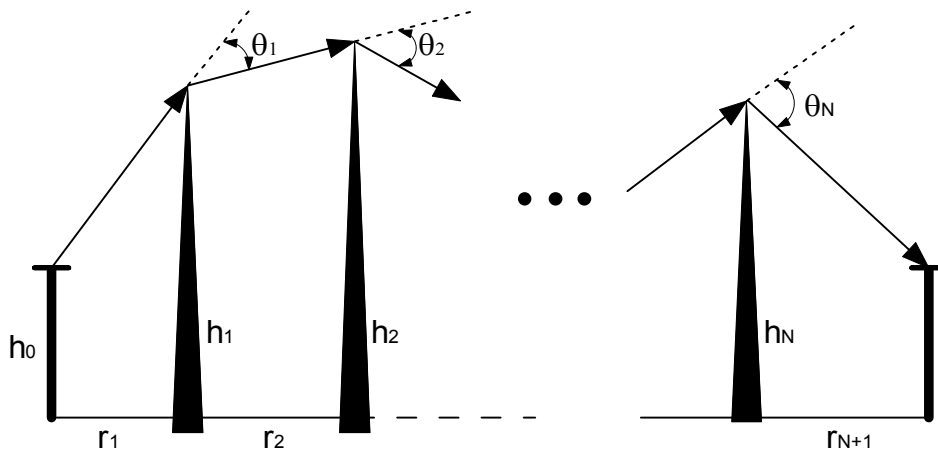
$$\alpha_N = 1, m_0 = m, m_k = 0, k \geq N-1$$

$$\beta_m = \theta_m \cdot \left[ \frac{j \cdot k \cdot r_m \cdot r_{m+1}}{2 \cdot (r_m + r_{m+1})} \right]^{1/2}, \quad m = 1, 2, \dots, N \text{ y } \theta \text{ es el ángulo mostrado en la}$$

figura 4.11.

$$\sigma_N = \beta_1^2 + \beta_2^2 \dots + \beta_N^2$$

**Figura 4.11: Geometría de la difracción por múltiples filos de cuchillo.**



Este modelo determinístico puede ser implementado en un programa computacional y representa la solución completa, en forma analítica, de la atenuación de la onda debida a múltiples difracciones haciendo uso de la representación de los objetos difractores como filos de cuchillo.

#### **4.4 PROPAGACIÓN EN AMBIENTE URBANO CON EDIFICIOS DISTRIBUIDOS IRREGULARMENTE UBICADOS SOBRE TERRENO ACCIDENTADO.**

Para determinar las condiciones de radio propagación cuando los edificios están distribuidos aleatoriamente sobre un terreno accidentado (tal es el caso de las ciudades ubicadas en la región andina), es necesario especificar todas las propiedades de la topografía de la ciudad teniendo en cuenta las condiciones particulares de la propagación de ondas en dicho terreno.

De acuerdo con lo anterior, podemos incluir una descripción estadística de los patrones reales de los edificios ubicados en la zona en estudio y determinar la intensidad de campo con base en esta, para posteriormente presentar un modelo de descripción de las características de pérdidas en las ciudades ubicadas en terreno escarpado.

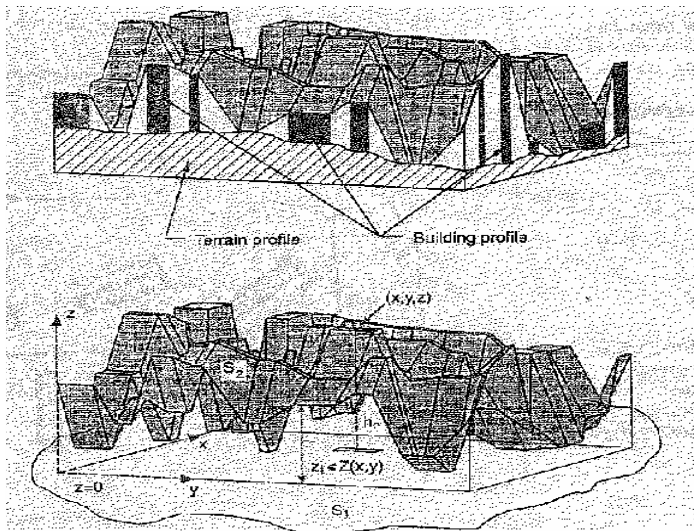
Para obtener una descripción estadística de la zona basados en su mapa topográfico, se necesita información detallada acerca de la distribución espacial de los edificios en la ciudad y los obstáculos naturales, los tamaños y rangos de las secciones de superficies reflectoras y difractoras del relieve terrestre, y la distribución espacial de las características de dispersión de cada edificio ubicado en áreas alrededor de las antenas transmisora y receptora.

#### 4.4.1 Descripción Estadística del Relieve de la Ciudad.

##### Distribución espacial de los edificios.

Considerando la función característica  $\xi(r) = \xi(x, y, z)$  como el relieve del borde de superficie entre dos semiespacios:  $\xi(r) = 0$  para  $z > Z(x, y)$  y  $\xi(r) = 1$  para  $z < Z(x, y)$  como se muestra en la figura 4.12.

**Figura 4.12: Superficie de relieve irregular  $z = Z(x, y)$**



- Fuente: Radio Propagation in Cellular Networks. Blaunstein, Nathan. Artech House. . Artech House. Pag 298.

Para el caso de  $z > 0$  se puede presentar tal función como [38]:

$$\xi(x, y, z) = \sum_{n=1}^N \xi_n(x, y) \xi_a^b(z)$$

Donde  $N$  es el número de edificios distribuidos aleatoriamente en el plano de superficie  $z=0$ ; la función  $\xi_n(x, y) = 1$  si la proyección del punto  $(x, y, z)$  en el plano  $z=0$  cae en el borde del contorno del edificio y  $\xi_n(x, y) = 0$  en el caso opuesto;  $b = h_n$  es la altura del edificio  $n$ ;  $\xi_a^b(z)$  es la función característica cuyo valor es 1 en el rango  $a < z < b$  (donde  $a$  puede ser igual a 0) y es igual

a cero fuera de ese intervalo. El valor promedio de  $\xi(r)$  se puede presentar como:

$$\langle \xi(r) \rangle = XP_h(z), \quad \text{donde } X = \left\langle \sum_{n=1}^N \xi_n(x, y) \right\rangle$$

y

$$P_h(z) = \int_z^{\infty} w(h_n) dh_n = \langle \xi_a^b \rangle$$

donde  $w(h_n)$  es la densidad de la distribución de la altura de los edificios y determina la probabilidad del evento de que  $z < h_n$ . El multiplicador  $X$  determina la probabilidad del evento de que la proyección del punto  $r$  sobre el plano  $z=0$  esté en cualquier edificio.

De acuerdo a lo anterior, se puede obtener la probabilidad de visibilidad directa entre dos puntos  $r_1$  y  $r_2$  ubicados en un área edificada casi homogénea, así:

$$P_{12} = \exp \left\{ -\gamma_0 |q_{\perp}| q_z^{-1} \int_{z_1}^{z_2} [P_h(z)] [1 - XP_h(z)]^{-1} dz \right\}$$

$$P_{12} = \exp \{ -\gamma_0 \gamma_{12} r_{12} \}, \quad \text{donde } r_{12} \text{ es el vector que está entre } r_1 \text{ y } r_2.$$

Lo anterior para el caso  $z_2 > z_1$  y una orientación arbitraria del vector unitario  $\mathbf{q}$ ,  $|q| = 1$ ;  $l = |r_2 - r_1|$ ,  $r_2 - r_1 = \mathbf{q}l$ ;  $q_{\perp}$  es la proyección del vector  $\mathbf{q}$  sobre el plano  $z=0$ ;  $q_z^2 = 1 - q_{\perp}^2$ ;  $\gamma_0$  es la densidad de los edificios en el plano de  $q_{\perp} = (q_x, q_y)$ .

A partir de estas ecuaciones se puede determinar la probabilidad de obtener visibilidad directa entre observadores arbitrarios ubicados en la zona en estudio como [12]:

$$\gamma_{12} = (z_2 - z_1)^{-1} \int_{z_1}^{z_2} [P_h(z)] [1 - XP_h(z)]^{-1} dz, \quad z_2 > z_1$$

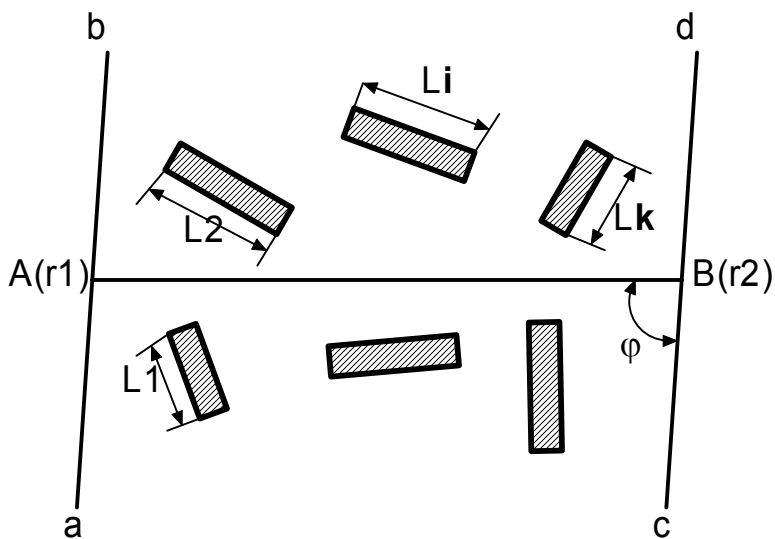
Si  $\bar{L}$  es el promedio de la longitud de los edificios alrededor de los puntos  $A(r_1)$  y  $B(r_2)$  como se muestra en la figura 4.13, la probabilidad de las intersecciones de la línea  $AB$  con los edificios es igual a:

$$P_{12} = \exp\{-2\bar{L}r_{12} / \pi\}$$

de donde se puede definir el parámetro  $\gamma_0$  como:

$\gamma_0 = 2\bar{L}v / \pi$ , donde  $v$  es la densidad de los edificios en el área de estudio. El parámetro  $\gamma_0$  determina el promedio de la distancia horizontal de la línea de vista entre los puntos  $A(r_1)$  y  $B(r_2)$ .

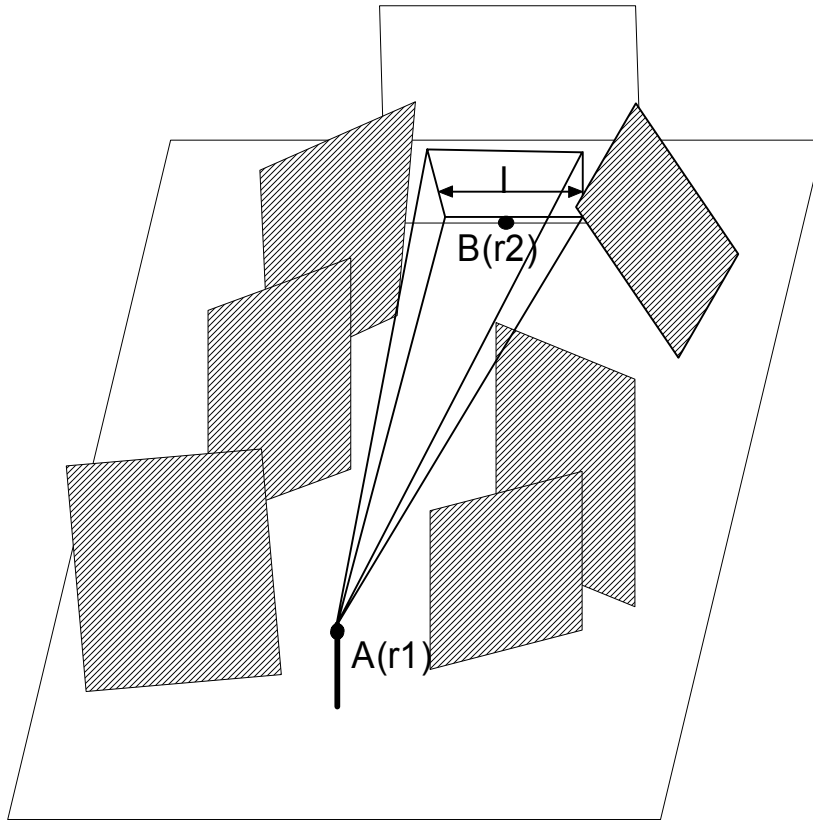
**Figura 4.13: Distribución de los edificios entre los puntos  $A(r_1)$  y  $B(r_2)$ .**



#### **Dimensiones de las secciones de superficies reflectoras.**

Consideremos el caso cuando existe LOS entre los puntos  $r_1$  y  $r_2$ . El punto  $r_2$  está ubicado en la base de la pantalla vertical como se muestra en la figura 4.14 (relacionada con la figura 4.13).

**Figura 4.14: Observación del punto  $r_2$  con respecto al punto  $r_1$**



Se debe determinar la probabilidad de que exista línea de vista entre los puntos  $A(\mathbf{r}_1)$  y  $B(\mathbf{r}_2)$ . La pantalla vertical forma un ángulo  $\Psi$  con la línea AB. Entonces la probabilidad de que exista visibilidad directa (LOS) en el segmento cd (ver figura 4.13) con longitud  $l$  es:

$$P_{cd} = \exp(-\gamma_0 \gamma_{12} r_{12} - \nu \epsilon_{12} r_{12} |\text{sen} \Psi| l)$$

$$\epsilon_{12} = (z_2 - z_1)^{-1} \int_{z_1}^{z_2} P_h(z) (z - z_1)(z_2 - z_1)^{-1} dz, \text{ donde } z > z_1, z_2, X = 1$$

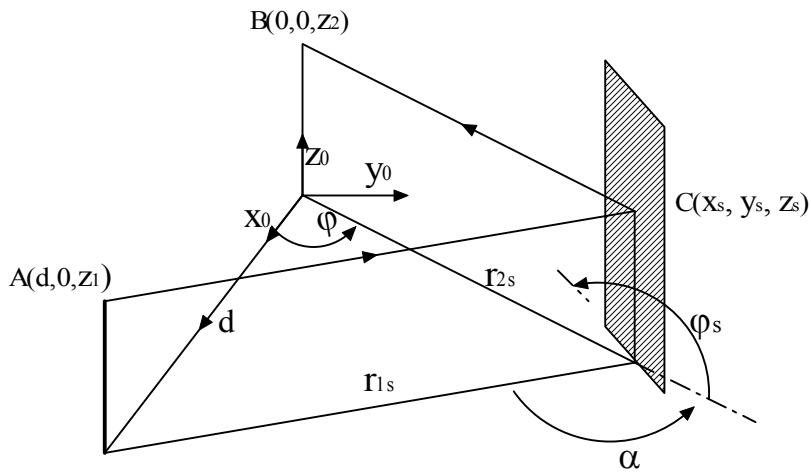
donde  $l = [\nu r_{12} \epsilon_{12} |\text{sen} \Psi|]^{-1}$  es el valor promedio del segmento cd;  $\nu$  es la densidad de los edificios en la superficie  $z=0$ . Para obtener un resultado más general de la probabilidad de que exista LOS en el segmento cd, es decir,

cuando X no sea igual a 1, se debe tener en cuenta la siguiente expresión para  $\epsilon_{12}$ :

$$\epsilon_{12} = (z_2 - z_1)^{-1} \int_{z_1}^{z_2} (z - z_1)(z_2 - z_1)^{-1} P_h(z) [1 - XP_h(z)]^{-1} dz .$$

### Distribución espacial de los puntos dispersores.

**Figura 4.15: Geometría tridimensional de dispersión sobre una pantalla.**



Si consideramos la figura 4.15, en la cual el punto C está ubicado al lado del contorno de un edificio de altura h. La orientación del edificio está determinada por el ángulo  $\Psi_s$  formado con el vector  $r_{2s}$ . El receptor (o transmisor) está ubicado en el punto B( $r_2$ ), el transmisor (o receptor) está ubicado en el punto A( $r_1$ ). La densidad de distribución de los puntos dispersores puede presentarse como [12]:

$$\mu(r_s) = \gamma_0 v \text{sen}^2(\alpha/2) [r_{1s} \in_{1s} + r_{s2} \in_{s2}] P_{1s} H_s P_{s2}$$

donde  $\in_{1s}$  y  $\in_{s2}$  son descritas por la ecuación para  $\epsilon_{12}$ ,  $P_{1s}$  y  $P_{s2}$  son descritas por la ecuación para  $P_{cd}$ .

Si ahora consideramos coordenadas polares con el punto B como punto base sobre el plano  $z=0$  (figuras 4.13, 4.14, 4.15), para fuentes distribuidas en

forma discreta la densidad de la distribución de puntos dispersores se puede expresar como:

a.) para  $z_1, z_2 < h$

$$\mu(r, \varphi) = 0.5v\gamma_0 r \text{sen}^2(\alpha/2)(r + \bar{r}) \exp\{-\gamma_0(r + \bar{r})\}$$

b.) para  $z_1 < h, z_2 > h$

$$\mu(r, \varphi) = (v\gamma_0 r/2h) \text{sen}^2(\alpha/2) \exp\{-\gamma_0(r + \bar{r})\} \int_0^h \left[ (r + \bar{r}) - r((z_2 - h)/(z_2 - z))^2 \right] \cdot \exp\{\gamma_0 r(z_2 - h)/(z_2 - z)\} dz$$

o para  $\gamma_0 r \gg 1$

$$\mu(r, \varphi) = 0.5v \text{sen}^2(\alpha/2) \left\{ \gamma_0 h r (r + \bar{r}) \exp[-\gamma_0(\bar{r} + hr/z_2)] / z_2 \right\} + 0.5v \text{sen}^2(\alpha/2) \left\{ (z_2 - h) \bar{r} \exp[-\gamma_0 \bar{r}] / h \right\} = \mu_1(r, \varphi) + \mu_2(r, \varphi)$$

donde  $\bar{r} = (d^2 + r^2 - 2rd \cos \varphi)^{1/2}$ ; y h es el promedio de las alturas de los edificios.

### Distribución de los puntos reflectores:

Estos puntos son aquellos que producen reflexión especular, los cuales son descritos por las leyes de la óptica geométrica. Se puede presentar la densidad de puntos de reflexión especular entre las áreas edificadas como [12]:

$$\mu(\tau, \varphi) = \frac{v\gamma_0 d^3}{4} \frac{(\tau^2 - 1)}{(\tau - \cos \varphi)} P_h(z_c) \exp\{-\gamma_0 \gamma_{12} \tau d\}$$

donde  $P_h(z_c)$  está en función de la variable:

$$z_c = z_2 - \frac{(\tau^2 - 1)}{2(\tau - \cos \varphi)} \frac{(z_2 - z_1)}{\tau}$$

donde  $\tau$  es el tiempo relativo de la propagación de ondas dispersoras desde un transmisor hacia el receptor, y es igual a:  $\tau = (r + \bar{r})/d$  (por óptica geométrica) [12].

Lo anterior asumiendo que la altura del punto B (receptor) es mayor que la altura del punto A (transmisor) y a su vez, es mayor que el promedio de la altura de los edificios  $h$ . Para obtener el número promedio de puntos en la reflexión especular, se integra  $\mu(\tau, \varphi)$  sobre  $\tau$  y luego sobre  $\varphi$ , es decir, se analiza la distribución de puntos  $\mu(\tau, \varphi)$  en el dominio del ángulo de llegada y luego en el dominio del tiempo de llegada considerando que la capa de edificios es uniforme y constante.

### Efectos multidispersión.

Teniendo en cuenta la distribución de Poisson, se puede calcular la probabilidad del evento de que al menos un rayo sea recibido después de haber sufrido  $n$  dispersiones debido a bordes distribuidos aleatoriamente así [12]:

$$P_n = 1 - \exp\{-\langle N_n(r) \rangle\}$$

donde la cantidad promedio de rayos dispersos  $n$ -veces puede ser obtenido de la probabilidad distribución de puntos dispersos  $\mu_n(r_0 | r_1, r_2, \dots, r_n)$ :

$$\langle N_n(r, r_0) \rangle = \int \dots \int \mu_1(r_0 | r_1, r_2, \dots, r_n) \dots \mu_n(r_0 | r_1, r_2, \dots, r_n) dr_n dr_{n-1} \dots dr_1$$

donde

$$\mu_i(r_0 | r_1, r_2, \dots, r_n) = \exp\left\{-\gamma_0 \sum_{i=0}^n |r_{i+1} - r_i|\right\} \prod_{i=0}^n 0.5 \gamma_0 v \left\{ |r_{i+1} - r_i| + |r_i - r_{i-1}| \sin^2(\alpha_i / 2) \right\}$$

El ángulo  $\alpha_i$  es el formado por los vectores  $(r_{i+1} - r_i)$  y  $(r_i - r_{i-1})$  para  $i=1, 2, \dots, n$ ; los cuales son los vectores cuyos puntos de inicio y finalización son aquellos localizados en los obstáculos que ocasionan las  $n$  dispersiones que afronta la onda de radio [12].

#### 4.4.2 Atenuación de la Intensidad de Campo en Zonas con Edificios Distribuidos Aleatoriamente.

##### El problema de la única dispersión.

Si consideramos ahora la superficie S descrita en la figura 4.12, como la superposición de una superficie plana perfectamente reflectora  $S_1$  y una superficie con relieve aleatoria  $S_2$ . Haciendo uso del teorema de Green [12] en su forma integral se puede expresar la intensidad de campo en terreno irregular como:

$$U(r_2) = U_i(r_2) + \int_S \left\{ U(r_s) \frac{\partial G(r_2, r_s)}{\partial n_s} - G(r_2, r_s) \frac{\partial U(r_s)}{\partial n_s} \right\} dS$$

donde  $U_i(r_2)$  es el campo de la onda incidente,  $G(r_2, r_s)$  es la función de Green del semiespacio [12]:

$$G(r_2, r_1) = \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{\exp[jk|r_2 - r_1|]}{|r_2 - r_1|} \pm \frac{\exp[jk|r_2 - r_1'|]}{|r_2 - r_1'|} \right\}$$

$n_s$  es el vector normal a la superficie S en el punto de dispersión  $r_s$ ;  $r_1'$  es el punto simétrico  $r_1$  relativo a la superficie de la tierra  $S_1$ ;  $j$  denota la parte imaginaria del campo,  $k = 2\pi / \lambda$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda.

Ahora si consideramos  $S_1$  ( $z=0$ ) una superficie plana ideal y  $S_2$  una superficie rugosa creada por las obstrucciones de los edificios y construimos la función de Green para satisfacer la aproximación electrodinámica general se puede describir la polarización vertical haciendo uso del signo (+) y la horizontal usando el signo -. De esta forma, cuando se utiliza el signo más (+) se satisfacen las condiciones de borde de Dirihlet [12] en una superficie plana,

$S_1$  ( $z=0$ ), a saber  $G_{z=0} = 2$  y  $\frac{\partial u}{\partial n_s} = 0$ . Igualmente se satisfacen las condiciones

de borde de Neuman [12] al usar el signo menos (-) en el plano  $z=0$ , a saber:  $G_{z=0} = 0$  y  $u = 0$ .

Por lo tanto, si la fuente es descrita por  $G(r_2, r_1)$ , asumiendo la superficie  $S_1$  perfectamente reflectora, se puede excluir la integración sobre la superficie  $S_1$ , usando la integración sólo sobre la superficie  $S_2$  y reduciendo el campo disperso como:

$$U(r_2) = G(r_2, r_1) + 2 \int_S \{U_r(r_s) \cdot (n_s \cdot \nabla_s) G(r_2, r_s)\}$$

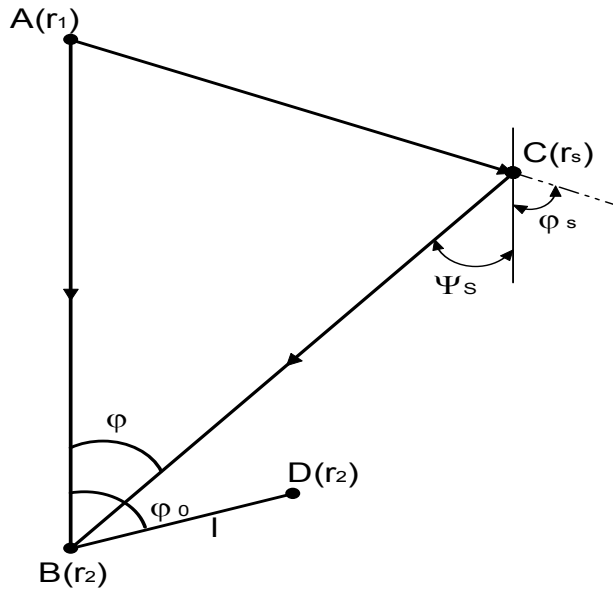
$$\text{donde } \nabla_s = \left( \frac{\partial}{\partial x_s}, \frac{\partial}{\partial y_s}, \frac{\partial}{\partial z_s} \right)$$

Usando la aproximación de Kirchhoff se determina el campo disperso  $U_r(r_s)$  como la superposición de una onda incidente  $U_i(r_s)$ , el coeficiente de reflexión  $\Gamma(\varphi_s, r_s)$ , y la función  $Z(r_2, r_1)$  la cual es igual a 1 si el punto dispersor  $r_s$  ubicado dentro de la capa de edificios puede ser observado desde los puntos  $r_1$  y  $r_2$  que son las ubicaciones del transmisor y el receptor y es igual a cero en los demás casos. Tomando en cuenta lo anterior la expresión para  $U(r_2)$  se puede describir, para el caso de única dispersión, como:

$$U(r_2) = Z(r_2, r_1)G(r_2, r_1) + 2 \int_{S_2} \{Z(r_2, r_s, r_1)\Gamma(\varphi_s, r_s)G(r_s, r_1) \cdot (n_s \cdot \nabla_s)G(r_2, r_s)\}dS$$

$$\text{donde } \text{sen} \varphi_s = n_s \cdot \frac{r_s - r_1}{|r_s - r_1|} \text{ ver figura 4.16.}$$

**Figura 4.16: Geometría Bidimensional de la simple dispersión desde una pantalla.**



Anteriormente, se había asumido que el coeficiente de reflexión de la superficie de los edificios,  $\Gamma(\varphi_s, \mathbf{r}_s)$ , era una variable aleatoria independientemente distribuída en la superficie de los mismos, tal que,  $\langle \Gamma(\varphi_s, \mathbf{r}_s) \rangle = 0$ . Ahora, se puede obtener el promedio sobre el intervalo de fase  $[0, 2\pi]$  con igual probabilidad de distribución de fase para el coeficiente de reflexión y sobre la posición de todos los edificios. Así se obtiene la siguiente expresión para la intensidad de campo promedio.

$$\langle U(r_2) \rangle = \langle Z(r_2, r_1) \rangle \cdot G(r_2, r_1) = P_{12} \cdot G(r_2, r_1)$$

Lo anterior quiere decir, que la intensidad de campo promedio se puede determinar por la probabilidad de recepción de la señal  $P_{12}$ .

A partir del campo promedio, se puede presentar la función de correlación de la onda  $K(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_2') = \langle U(\mathbf{r}_2) \cdot U^*(\mathbf{r}_2') \rangle$  después de promediar sobre el número de edificios, sus propiedades de reflexión, y su distribución espacial, como [12]:

$$K(r_2, r_2') = 16\pi \int_v dr \cdot P(r_1, r) \cdot \langle \sigma(r_2, r, r_1) \rangle \cdot P_h(z) \cdot P_{BD} \\ \cdot |G(r_2, r_s)|^2 \cdot |G(r_s, r_1)|^2 \cdot \exp\{ikl \cos(\varphi - \varphi_0)\}$$

Donde  $P(\mathbf{r}_1, \mathbf{r})$  es la probabilidad de visibilidad directa entre los puntos  $\mathbf{r}_1$  y  $\mathbf{r}$  de acuerdo a la expresión dada anteriormente para  $P_{12}$ , la función del relieve  $P_h(z)$  ya se definió,  $P_{BD}$  determina la probabilidad del evento que la onda, después de la dispersión desde el punto  $\mathbf{r}$  y después de llegar al punto  $\mathbf{r}_2$  con el ángulo  $\varphi$ , se proyecte hacia el segmento  $l$  orientado a  $(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)$  bajo un ángulo  $\varphi_0$  (ver figura 4.16) y  $\langle \sigma(r_2, r, r_1) \rangle$  es la sección transversal diferencial de los edificios dispersores, definida por:

$$\langle \sigma(r_2, r, r_1) \rangle = \frac{\gamma_0 \Gamma(\alpha/2)}{4\pi} \text{sen}^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{4kl_v}{1 + (kl_v)^2 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)^2}$$

donde  $\alpha$  es el ángulo entre los vectores  $(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_1)$  y  $(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_s)$  de acuerdo a la figura 4.15.

Teniendo en cuenta la relación existente entre la función de correlación y la intensidad promedio del campo total, se puede determinar esta intensidad, como:

$$\langle I(r_2) \rangle \equiv K(r_2, r_2) = 16\pi \int_v dr \cdot P(r, r_2) \cdot \langle \sigma(r_2, r, r_1) \rangle \cdot P_h(z) \cdot P_{BD} \\ \cdot |G(r_2, r)|^2 \cdot |G(r, r_1)|^2 \cdot \exp\{ikl \cos(\varphi - \varphi_0)\}$$

O, de la siguiente forma

$$\langle I(r_2) \rangle = \frac{\Gamma \lambda l_v}{8\pi [\lambda^2 + (2\pi l_v \gamma_0 (h - z_1))^2] d^3} (z_2 - h)$$

Esta ecuación corresponde a la intensidad promedio del campo disperso  $\langle I_{inc} \rangle$ , que permite calcular la intensidad de campo total como la

superposición del campo disperso (incoherente)  $\langle I_{inc} \rangle$  y el campo coherente  $\langle I_{co} \rangle$  de la energía total, el cual se define por:

$$\langle I_{co} \rangle = \exp\left[-\gamma_0 \frac{d(h-z_1)}{z_2-z_1}\right] \frac{[\text{sen}(kz_1z_2)/d]^2}{4\pi^2 d^2}$$

Cuando  $z_2 = h$ , la intensidad de campo disperso  $\langle I_{inc} \rangle = 0$ , lo cual es físicamente incorrecto. Para solucionar este inconveniente, se debe tener en cuenta el proceso de difracción (que se tratará más adelante). Sin embargo, la ecuación presentada describe correctamente la dependencia de la frecuencia del proceso de propagación en un área edificada, el cual es  $\sim f^{-n}$  con  $n < 0$  para frecuencias en la banda VHF y parte baja de la banda UHF ( $f \ll 1$  GHz), y  $\sim f^n$  con  $n > 0$  para la banda UHF y mayores ( $f > 0.5$  GHz).

### **El problema de la Multidispersión.**

En el caso en que ambas antenas (transmisor y receptor) están ubicadas por debajo del techo de los edificios ( $0 < z_1, z_2 < h$ ), el efecto de la multidispersión llega a ser más fuerte que el problema de la única dispersión.

Para calcular la intensidad promedio del campo escalar se pueden utilizar las aproximaciones presentadas anteriormente y aplicando el siguiente procedimiento. Tomando dos pantallas no transparentes con longitud promedio  $\bar{L}$  y altura promedio  $h$  distribuidas en forma aleatoria en la superficie del terreno. Sus distribuciones espaciales son independientes sobre el plano  $z=0$  y su densidad promedio es  $v$ .

Para el caso  $0 < z_1, z_2 < h$ , la probabilidad de visibilidad directa entre los puntos  $\mathbf{r}_1(x_1, y_1, z_1)$  y  $\mathbf{r}_2(x_2, y_2, z_2)$  es determinada por la siguiente expresión:

$$P(r_1, r_2) = \exp\{-\gamma_0 |\rho_1 - \rho_2|\}, \quad \rho_i = (x_i, y_i), \quad i = 1, 2$$

donde,  $\gamma_0 = 2v\bar{L} / \pi$ ,  $\gamma_0^{-1} = \bar{\rho}$  es un rango horizontal promedio de la visibilidad directa en la capa  $0 < z < h$ . Se asume también que el coeficiente de reflexión  $\Gamma$  está distribuido aleatoriamente (pero independientemente) sobre la superficie de los edificios, tal que  $\langle \Gamma \rangle = 0$ . Aplicando la función convencional de Green para el espacio libre, se puede presentar el campo fuente  $\bar{G}(r_1, r_2')$  en el punto  $r_1$  sobre la superficie  $z = 0$  como:

$$\bar{G}(r_1, r_2) = G(r_1 - r_2) \pm G(r_1 - r_2')$$

$$G(r) = \frac{\exp(jk|r|)}{4\pi|r|}$$

donde  $r'$  es el punto simétrico al punto  $r$  relativo al plano  $z = 0$ , y  $\bar{G}(r_1, r_2')$  es la función de Green para el semiespacio. Usando el teorema de Green, la expansión de la función de Green [12] y asumiendo que  $z_1 < h$ , se puede obtener la parte coherente de la intensidad promedio del campo total  $\langle I_{co} \rangle$ :

$$\langle I_{co}(r_2) \rangle = P(r_2, r_1) G(r_2, r_1)$$

Después de realizadas las operaciones se puede presentar la parte coherente como:

$$\langle I_{co}(\rho) \rangle = \exp[-\gamma_0 \rho] \frac{[2 \text{sen}(kz_1 z_2) / \rho]^2}{16\pi^2 \rho^2}$$

Usando el método de Laplace para obtener la parte no coherente de la intensidad de campo total para el caso  $\gamma_0 \rho \gg 1$  y  $a = \gamma_0 \Gamma / 8$ , se obtiene:

$$\langle I_{inc}(\rho) \rangle = 2a^{1/2} \exp[-\gamma_0 \rho] \left\{ 2/\gamma_0 \rho + a\pi^{1/2} / \gamma_0 (2\gamma_0 \rho)^{1/2} + (a/\gamma_0)^3 \right\} / (4\pi)^2 \rho$$

Tal que la intensidad de campo total es:

$$\langle I(\rho) \rangle = \langle I_{CO}(\rho) \rangle + \langle I_{inc}(\rho) \rangle$$

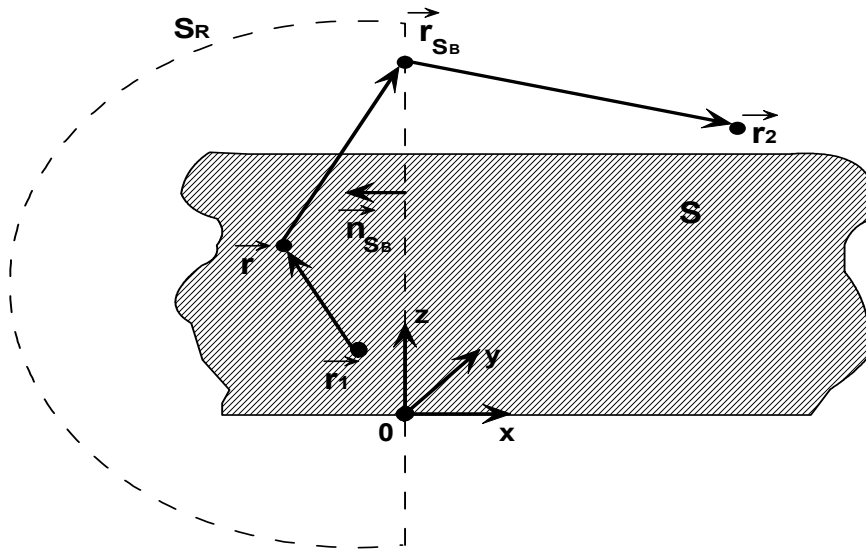
De acuerdo a lo anterior se puede calcular el Path Loss como:

$$L_{Total} = -10 \log(\langle I(\rho) \rangle)$$

### **Efecto de la difracción en áreas edificadas.**

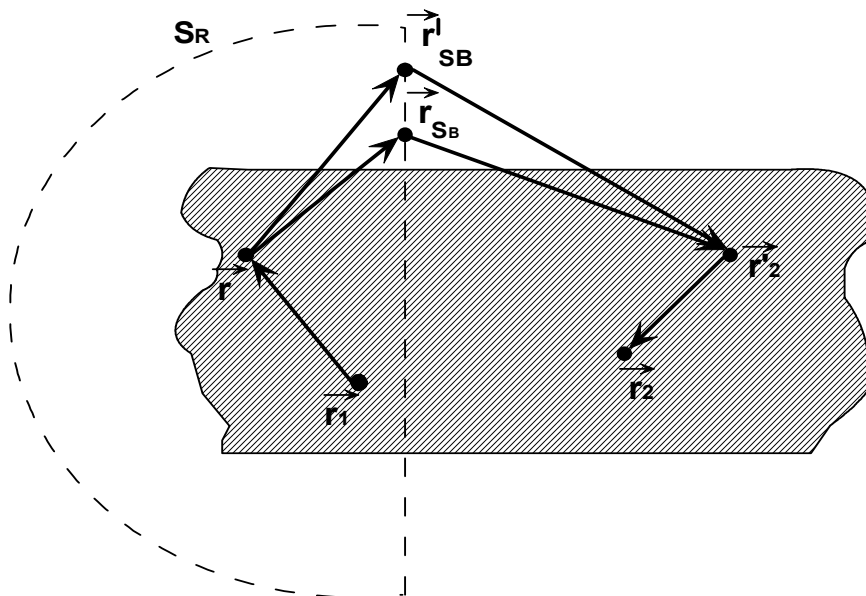
Anteriormente, se había mencionado que la intensidad promedio de la señal recibida era cero cuando la antena receptora estaba al nivel del techo de los edificios ( $z_2 = h$ ), lo cual es un resultado físico incorrecto. Para encontrar el resultado acertado, es necesario considerar la influencia del fenómeno de la difracción. Para tener en cuenta dicho fenómeno, se hace uso de la aproximación de Huygens-Kirchhoff. El campo difractado se puede encontrar introduciendo la superficie de fuentes virtuales  $S_B$  normal a las áreas edificadas  $S$  y la superficie de semiesfera  $S_R$  que contiene la fuente de radiación adentro. (ver figura 4.17a).

Figura 4.17: (a) Geometría de la única dispersión con única difracción sobre una capa de terreno edificada.



(a)

(b) Geometría de la doble dispersión y doble difracción sobre una capa de terreno edificada.



(b)

El efecto de todas las fuentes virtuales colocadas en la semiesfera  $S_R$  es despreciable, porque se limita a cero cuando el radio de la semiesfera se

vuelve infinito. Por lo tanto la intensidad de campo en el receptor se puede expresar como:

$$U(r_2) = 2ik \int_{S_B} \left\{ U(r_{S_B}) \cdot G(r_2, r_{S_B}) \cdot \cos \Psi_{S_B} \right\} dS_B$$

donde  $U(r_{S_B})$  es el campo en la superficie  $S_B$  obtenido haciendo uso de la aproximación para única dispersión;  $\cos \Psi_{S_B} = (n_{S_B} \cdot (r_2 - r_{S_B}) / |r_2 - r_{S_B}|)$ ,  $n_{S_B}$  es el vector normal a la superficie  $S_B$  (figura 4.17a). De acuerdo a  $\langle I(r_2) \rangle = \langle U(r_2) \cdot U^*(r_2) \rangle$ , la intensidad de campo recibido se puede presentar como:

$$\langle I(r_2) \rangle = 4k^2 \int_{S_B} dS_B \int_{S_B} dS'_B \cdot K(r_{S_B}, r_{S'_B}) \cdot G(r_2, r_{S'_B}) \cdot G(r_2, r_{S_B}) \cos \Psi_{S_B} \cos \Psi_{S'_B}$$

donde  $K(r_{S_B}, r_{S'_B})$  es la función de correlación del campo total en los puntos  $r_{S_B}$  y  $r_{S'_B}$  localizados en la superficie  $S_B$  cuando la fuente está localizada en el punto  $r_1$  definido por:

$$K(r_{S_B}, r_{S'_B}) = 4k^2 \left\langle \int_{S_B} dS_B \int_{S_B} dS'_B \cdot Z(r_2, r_{S_B}, r_1) \cdot Z(r_2', r_{S'_B}, r_1) \cdot \Gamma(\varphi_{S_B}, r_{S_B}) \times \Gamma^*(\varphi_{S'_B}, r_{S'_B}) \cdot \right. \\ \left. \cdot \text{sen} \Psi_{S_B} \cdot \text{sen} \Psi_{S'_B} \cdot G(r_2, r_{S_B}) \cdot G(r_{S_B}, r_1) \cdot G^*(r_2', r_{S'_B}) \cdot G^*(r_{S'_B}, r_1) \right\rangle$$

donde el coeficiente de reflexión  $\Gamma(\varphi_S, r_S)$  y la función  $Z(r_2, r_1)$  son expuestas en [12]. Realizando el promedio sobre una distribución espacial de pantallas no transparentes, teniendo en cuenta su número y sus propiedades de reflexión, se puede obtener la expresión para el campo recibido con la aproximación de única dispersión y teniendo en cuenta la difracción, como:

$$\langle I(r_2) \rangle = \frac{\Gamma \lambda_l \nu}{8\pi \left[ \lambda^2 + (2\pi d_\nu \gamma_0 (h - z_1))^2 \right] d^3} \left[ (\lambda d / 4\pi^3) + (z_2 - h)^2 \right]^{1/2}$$

En el caso cuando tanto la estación base como la antena receptora se encuentran sobre la altura promedio de los edificios, lo cual es  $(\lambda d / 4\pi^3)^{1/2} \ll (z_2 - h)^2$ , la expresión anterior se limita al espectro no coherente. Además, cuando  $z_2$  se incrementa, el efecto de la difracción llega a ser más importante tal que  $\langle I_{inc} \rangle \approx (\lambda d / 4\pi^3)^{1/2}$  cuando  $z = h$  (con lo cual se corrige el resultado físico que se había obtenido sin tener en cuenta la difracción).

De igual forma se obtiene el resultado para la doble difracción con doble dispersión (tal como se muestra en la figura 4.17b). La onda se propaga desde  $r_1$ , se introducen dos fuentes virtuales  $r_{S_B}$  y  $r_{S_B}'$  en la superficie  $S_B$  para obtener con un procedimiento similar:

$$\langle I(r_2) \rangle = 4k^2 \int_{S_B} dS_B \int_{S_B} dS_B' \cdot K(r_{S_B}, r_{S_B}' | r, r_1) \cdot K(r_{S_B}, r_{S_B}' | r', r_1) \cos \Psi_{S_B} \cos \Psi_{S_B}'$$

donde  $K(r_{S_B}, r_{S_B}' | r, r_1)$  y  $K(r_{S_B}, r_{S_B}' | r', r_1)$  son las funciones de correlación del campo total en la superficie de las fuentes virtuales teniendo en cuenta el efecto de la difracción determinado anteriormente. Realizando el promedio sobre una distribución espacial de pantallas no transparentes, teniendo en cuenta su número y sus propiedades de reflexión, se puede obtener la expresión para el campo con doble dispersión teniendo en cuenta la doble difracción, como:

$$\langle I_{inc}(r_2) \rangle = \frac{\Gamma^2 \lambda^3 l_v^2}{24\pi^2 [\lambda^2 + (2\pi l_v \gamma_0 (h - z_1))^2] [\lambda^2 + (2\pi l_v \gamma_0 (h - z_2))^2] d^3}$$

De la expresión anterior, se deduce que la intensidad promedio se atenúa proporcionalmente a  $\sim d^{-3}$ , el cual es un valor cercano al obtenido sin considerar la difracción ( $\sim d^{-2}$ ). Además se puede ver que la dependencia del proceso de propagación en un área edificada con respecto a la frecuencia es:  $\sim f^n$  para  $n < 0$  para frecuencias en la banda VHF y parte baja de la banda UHF ( $f \ll 1$  GHz), y  $\sim f^n$  con  $n > 0$  para la banda UHF y mayores ( $f > 0.5$  GHz).

## **5. RADIO PROPAGACIÓN EN AMBIENTE INALÁMBRICO MÓVIL CON TECNOLOGÍA CDMA.**

### **5.1 INTRODUCCIÓN.**

Después de haber presentado los aspectos principales que determinan las condiciones de propagación electromagnética sobre terreno escarpado, se abordan las características propias de radio propagación para el sistema CDMA. Cabe resaltar que la planificación celular y por ende los conceptos de radio propagación son diferentes para los sistemas de telefonía móvil de banda angosta y de banda ancha, sin embargo, aplicando algunos supuestos, es posible analizar los sistemas de banda ancha mediante aproximaciones de banda angosta. Haciendo uso de estas impresiones se realizarán simulaciones de predicciones de potencia mediante modelos de planificación celular de banda angosta en el siguiente capítulo, por lo tanto en este capítulo se expondrán los conceptos principales de los modelos de radio propagación que serán utilizados para tal propósito. Finalmente, se mencionarán algunos métodos desarrollados para sobrellevar los inconvenientes presentados en los sistemas de comunicaciones móviles de banda ancha, especialmente CDMA.

### **5.2 CONDICIONES GENERALES**

La interfaz de radio es única para las comunicaciones inalámbricas y es responsable de la complejidad asociada con las redes inalámbricas y teléfonos móviles. A su vez se ve afectada por factores de gran y pequeña escala. Los efectos de gran escala son debido a la atenuación de la transmisión de la señal a través de la atmósfera y a la ocasionada por las características propias del relieve en cual se propagan las ondas

electromagnéticas. Los efectos de pequeña escala son impredecibles y varían rápidamente en pequeñas distancias.

### 5.2.1 Efectos de gran escala.

Entre los efectos de gran escala podemos encontrar:

#### **Path loss.**

Se define como la atenuación de la señal transmitida cuando se propaga a través de la atmósfera. Está modelado por:

$$r(d) \propto d^{-n}$$

donde  $r(d)$  es la potencia recibida en una distancia  $d$  entre el móvil y la estación base, y  $n$  es el exponente del path loss con valores típicos de 2.7 a 3.5 para radio celular urbano [39]. Este modelo es simple y es apropiado para propagación de línea de vista.

#### **Shadowing o Slow Fading.**

En condiciones reales, el camino de la señal es entorpecido por obstrucciones que reflejan o bloquean la señal transmitida e introducen variabilidad estática al simple modelo de Path loss. Este efecto es modelado por una variable aleatoria log-normal [2] obteniendo la siguiente expresión derivada de la expresión presentada anteriormente:

$$R(d) \propto 10^{\chi/10} d^{-n}$$

Donde,  $\chi$  es la variable aleatoria log-normal.

### **5.2.2 Efectos de pequeña escala.**

Entre los efectos de pequeña escala se encuentran:

#### **Multipath Fading**

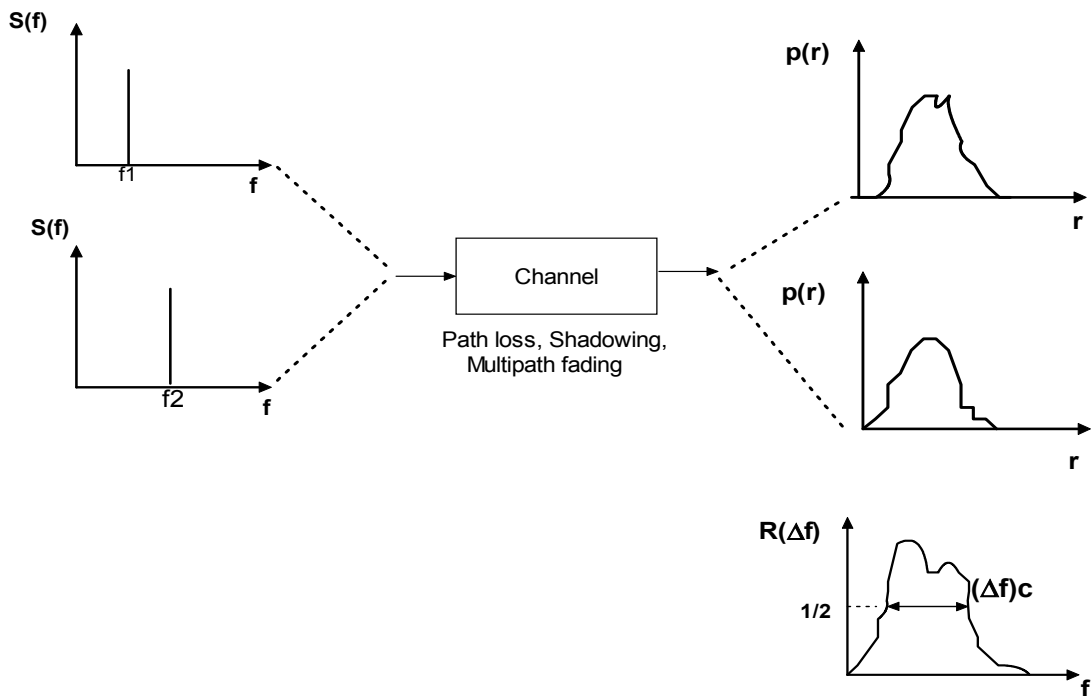
La señal transmitida no está restringida a la propagación de línea de vista. Esta puede rebotar en obstrucciones cercanas, tales como edificios y montañas y llegar al receptor. Las ondas reflejadas viajan por diferentes caminos hacia la antena receptora y consecuentemente experimentan diferentes demoras de propagación y pérdidas por trayectoria; esto resulta en un retardo en el tiempo conocido como rayos multicamino. Dichos rayos son sumados vectorialmente y producen fluctuaciones en el nivel de potencia recibida por el móvil. Desafortunadamente, es posible que los rayos se combinen destructivamente y la señal recibida pueda desaparecer completamente en un corto periodo de tiempo, a este fenómeno se le denomina multipath fading.

El multipath fading es creado por las características de selectividad de frecuencia y variación de tiempo del canal de comunicación. Estas características no son determinísticas y por lo tanto deben ser analizadas usando métodos estadísticos [39]. Para ilustrar este concepto se puede analizar los siguientes casos:

En el primero, dos señales en frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  son transmitidas como se muestra en la figura 5.1 Las señales son afectadas por el canal, el cual atenúa el nivel de potencia de cada una de las señales independientemente. El proceso de atenuación para cada señal varía con la frecuencia y puede ser descrito por dos funciones de densidad de probabilidad distintas (pdf's), si  $f_1$  es aproximadamente igual a  $f_2$ , entonces las pdf's de los niveles de potencia recibida  $p(r)$  serán prácticamente las mismas, y la correlación

cruzada entre las dos,  $R(\Delta f)$ , será alta. Cuando la separación entre  $f_1$  y  $f_2$  se incrementa, la amplitud de las pdf's será diferente y su correlación cruzada será baja.

**Figura 5.1: Comportamiento de la selectividad de frecuencia. Afecta dos señales transmitidas en forma diferente.**

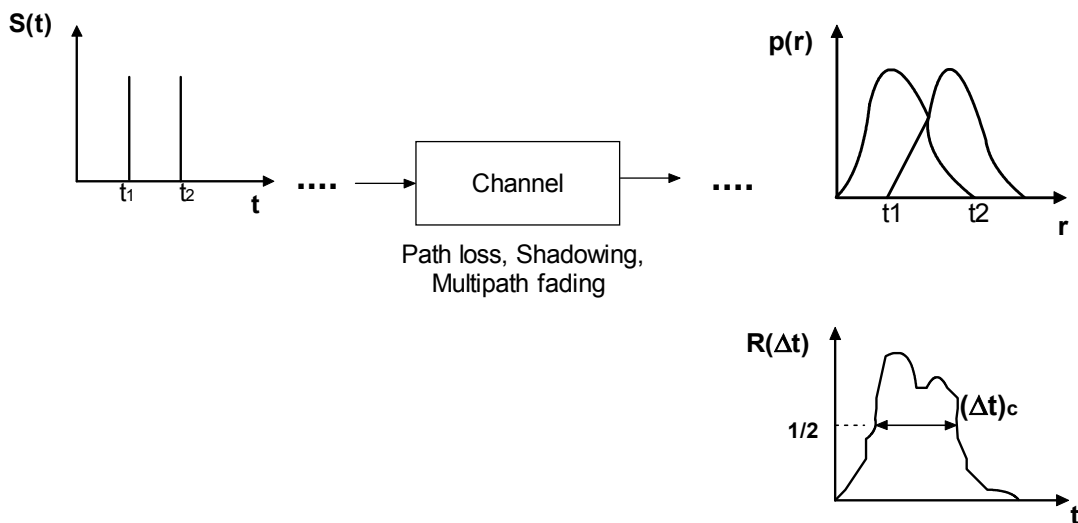


De lo anterior surge el concepto de ancho de banda coherente,  $(\Delta f)_c$ , que es el rango de frecuencias en el cual la respuesta del canal se mantiene constante, es decir, el canal afecta un rango de frecuencias  $(\Delta f)_c$  de  $f_1$  a  $f_2$ , en forma similar. Por lo tanto las señales de banda angosta que se encuentran en la coherencia del ancho de banda experimentan un mismo desvanecimiento de frecuencia. Esto implica que la función de transferencia del canal de comunicación es espectralmente uniforme, con ganancia constante y fase lineal. Por otra parte, las señales de banda ancha, como las generadas por modulación de espectro expandido de secuencia directa (ej. CDMA) se extienden típicamente más allá del ancho de banda coherente y

experimentan desvanecimiento por selectividad de frecuencia. Para señales de banda ancha, sólo una porción de la señal se desvanece, por lo tanto la integridad del enlace de radio es preservada a través de la diversidad de frecuencia [2].

En el segundo caso dos señales idénticas son transmitidas en diferentes tiempos  $t_1$  y  $t_2$ , como se muestra en la figura 5.2. El canal afecta el nivel de potencia de cada señal recibida independientemente y produce distintas pdf's. Si  $t_1$  es aproximadamente igual a  $t_2$ , la correlación cruzada de las dos formas de onda será alta. Pero al incrementarse la separación entre  $t_1$  y  $t_2$ , la correlación cruzada será más baja. Esto indica que la respuesta al canal se mantiene constante entre la separación de estas señales, lo cual es conocido como el tiempo de coherencia del canal,  $(\Delta t)_c$ .

**Figura 5.2: Comportamiento de la variación de tiempo del canal. Afecta dos pulsos transmitidos en diferente tiempo en forma diferente.**



La coherencia del ancho de banda y el tiempo de coherencia son parámetros claves para las medidas del canal de comunicación. Estos parámetros guían a un segundo juego de parámetros conocidos como funciones de dispersión,

que describen los efectos sobre la señal transmitida. Las funciones de dispersión  $S(\tau, \gamma)$  son encontradas por medio de la transformada de Fourier de funciones de correlación cruzada:

$$R(\Delta f, \Delta t) \leftrightarrow S(\tau, \gamma)$$

Donde el retardo de ensanchamiento multicamino (Delay spread),  $\tau$  esta relacionado a  $1/(\Delta f)_c$ , y el ensanchamiento doppler (Doppler Spread),  $\gamma$  es asociado a  $1/(\Delta t)_c$ .

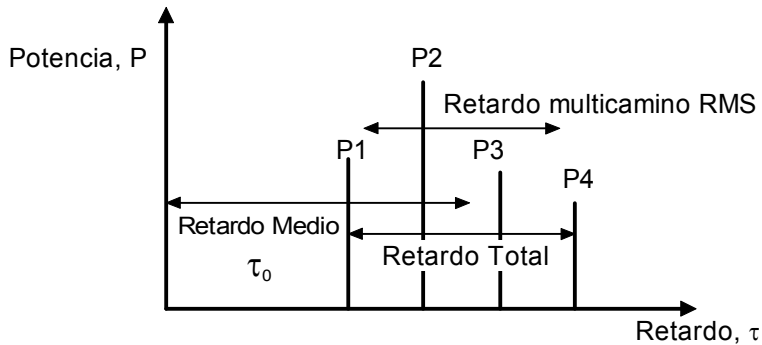
Los parámetros de correlación cruzada y funciones de dispersión son efectos de pequeña escala causados por la propagación multicamino a través del canal de comunicación. Estos rayos multicaminos son señales duplicadas con diferente fase de la señal original. Consecuentemente la señal recibida en cualquier instante  $t_0$  está descrita por:

$$r^2(t_0) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n^2(t_0)$$

donde  $a_n$  es la amplitud de los  $n$  rayos multicamino.

El Delay spread multicamino ( $\tau$ ) es especialmente importante en sistemas de comunicaciones digitales. Este mide el ensanchamiento en la señal recibida cuando un impulso es transmitido a través del canal de comunicación. La medida del Delay spread multicamino RMS para un sistema celular típico es ilustrada en la figura 5.3. El primer pico corresponde generalmente al rayo de línea de vista, mientras que los demás picos revelan el escalamiento y las demoras de propagación de la intensidad de los rayos multicamino. El Delay spread cubre el intervalo de tiempo desde el primer pico hasta el último pico más significativo.

**Figura 5.3: Retardo de Ensanchamiento (Delay Spread).**



El Delay spread causa el traslape de los bits de datos adyacentes y produce interferencia intersímbolos (ISI). En sistemas de comunicaciones de banda angosta, esto puede ser un desastre y debe ser removido por técnicas de ecualización. En sistemas de banda ancha, tal es el caso de CDMA, es posible remover las demoras de las componentes multicamino y alinear los rayos usando métodos de procesamiento de señal tal como Rake Receiver [2].

Esto produce el promedio de la potencia recibida:

$$E_{a,\theta}[P_r] = \sum_{n=0}^{N-1} a_n^2$$

En donde el promedio está calculado usando todos los rayos multicamino significativos. La potencia total después del alineamiento se aproxima al valor debido al ensombrecimiento log-normal (shadowing), eliminando los efectos multicamino tal como serán los análisis que se realizaran con las simulaciones y campañas de medidas. Además, en la mayoría de los casos, es suficiente considerar solamente las componentes multicamino más significativas, simplificando el procesamiento de la señal. Este procedimiento es utilizado en el análisis de datos y simulaciones realizadas para microceldas y picoceldas [2].

### **Fast Fading de Banda Ancha**

En los sistemas inalámbricos de banda ancha (CDMA), el Fast Fading surge como resultado de pequeñas diferencias de longitud entre los caminos de los diferentes rayos que se forman debido a los puntos dispersores localizados entre el transmisor (estación base) y el receptor (terminal móvil). Estas diferencias, en el orden de unas pocas longitudes de onda, se traducen en significativas diferencias de fase, que al sumarse pueden ocasionar considerable interferencia o incluso eliminar la señal.

Así, el canal de banda ancha puede considerarse como una combinación de varios caminos sujetos a fast fading de banda angosta con apropiadas demoras en cada uno. Dichas demoras dependen del ambiente en el cual el sistema está operando, por lo tanto podemos considerar que el Delay spread es una función del tamaño de la celda.

Si las demoras de propagación son mayores comparadas con la unidad básica de información transmitida sobre el canal (usualmente un símbolo o bit), la señal experimentará una distorsión significativa, la cual varía a través del canal de banda ancha. Este efecto se presentará en donde quiera que el sistema transmita señales electromagnéticas, de esto se puede afirmar que la definición de un canal de banda ancha incluye las características de la señal y el canal como tal. Cabe resaltar que cualquier modelo de radio propagación debe tener en cuenta estos efectos, con el fin de predecir correctamente la radio propagación de ondas electromagnéticas en un canal de banda ancha.

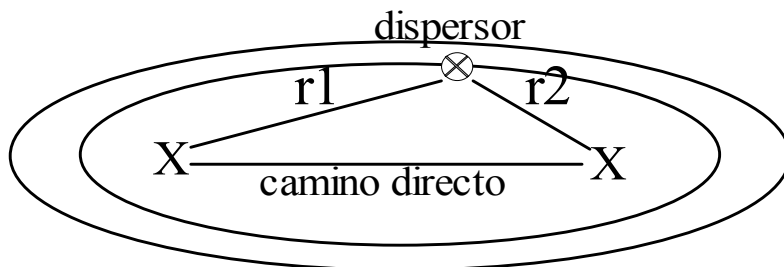
Por otra parte, el movimiento relativo entre el receptor y el transmisor, y el movimiento de los objetos cercanos al receptor producen una modulación en frecuencia aleatoria debido a efectos doppler en cada una de las componentes multitrayectoria [40], esta modulación en frecuencia contribuye en gran medida al aumento del retardo de propagación de los rayos multicaminos al desplazarlos en tiempo y frecuencia.

Por lo tanto, el canal de banda ancha está compuesto de la energía que recibe el terminal móvil desde el camino directo (no necesariamente con línea de vista) y de los rayos dispersos. Si se considera una sola dispersión, todos los rayos dispersos localizados en una elipse con la estación base y el terminal móvil como sus focos, contribuirán a la energía total con la misma demora (ver figura 5.4), dada en términos de las distancias entre los terminales y el objeto dispersor como:

$$\tau = \frac{r_1 + r_2}{c}$$

donde  $r_1$  y  $r_2$  se muestran en la figura 5.4.

**Figura 5.4: Localización de los rayos dispersores que contribuyen a la energía total. Elipse con la estación base y el terminal móvil como focos.**



La señal recibida en el móvil,  $y$ , está compuesta de suma de todas las ondas dispersas; las cuales tienen fase  $\theta$ , amplitud  $a$ , demora  $\tau$  y dependen del coeficiente de reflexión y de las características de dispersión de los objetos dispersores, así:

$$y = a_1 e^{j(\omega t_1 + \theta_1)} + a_2 e^{j(\omega t_2 + \theta_2)} + \dots$$

Cada uno de los componentes en esta expresión constituye un “eco” de la señal transmitida. En el canal de banda angosta, LAS DEMORAS de tiempo de las ondas recibidas son aproximadamente iguales, tal que la amplitud no depende de la frecuencia de la portadora:

$$y = e^{jw\tau} (a_1 e^{j\theta_1} + a_2 e^{j\theta_2} + \dots)$$

Todas las frecuencias de la señal recibida son por lo tanto afectadas en la misma forma por el canal, y el canal se representa por una simple componente multiplicativa. Si las demoras de tiempo relativas para las ondas recibidas son significativamente diferentes, el canal varía con la frecuencia y el espectro de la señal recibida será distorsionado.

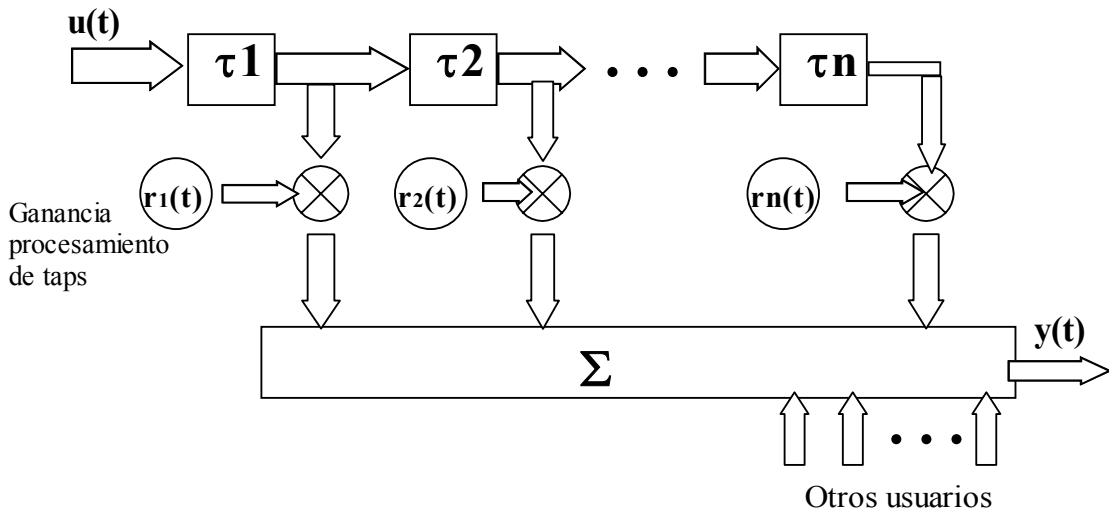
### **Modelamiento del canal de banda ancha.**

La forma estándar del modelo para el canal móvil de banda ancha se muestra en la figura 5.5. Los efectos de los dispersores en los rangos de demora discretos son agrupados en “taps” individuales con la misma demora; cada tap representa un grupo de rayos y son utilizados para realizar el modelo del canal de banda ancha. Cada “tap” tiene una ganancia variante en el tiempo de acuerdo a la estadística para los canales de banda angosta [2]. Se asume que los taps son no correlacionados entre ellos, ya que surgen de los dispersores los cuales son físicamente diferentes y se encuentran separados normalmente varias longitudes de onda. El canal, por lo tanto se asemeja a un filtro lineal con una respuesta al impulso finita y variante en el tiempo. Esta respuesta al impulso se conocerá como la entrada de la función de delay spread.

La amplitud de cada tap varia justo como en el caso de banda angosta, con un desvanecimiento proporcional a la velocidad del vehículo y la frecuencia

de la portadora, y con la estadística de primer orden el cual puede ser aproximado por la distribución de Rice o Rayleigh.

**Figura 5.5: Modelo del canal de banda ancha.**



### Parámetros para el canal de banda ancha

La potencia media relativa de los taps es especificada por el perfil de retardo de potencia (PDP) para el canal, que está definida como la variación de la potencia media en el canal con demora, así:

$$P(\tau) = \frac{E\{|h(t, \tau)|^2\}}{2}$$

Generalmente, el perfil de retardo de potencia es discreto en la dimensión de demora para producir una potencia de taps individuales  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , donde cada proceso de ganancia de tap puede tener una distribución de Rayleigh o de Rice [9].

El PDP puede ser caracterizado por los siguientes parámetros (los cuales se pueden ver en la gráfica 5.3):

- Exceso de demora: La demora desde cualquier tap relativo con respecto al primero que llega.
- Exceso total de demora: Es la diferencia entre la demora del primero y el último tap que llega. Esta es la cantidad por el cual la duración de un símbolo transmitido se extiende por el canal.
- Demora Media: La demora media corresponde al centro de gravedad del perfil, definido por:

$$\tau_0 = \frac{1}{P_T} \sum_{i=1}^n p_i \tau_i, \quad \text{donde,}$$

$p_i$  = potencia de cada rayo,

$\tau_i$  = Delay Spread de cada rayo.

y la potencia total en el canal es  $P_T = \sum_{i=1}^n P_i$

- Demora de ensanchamiento RMS: Es el segundo momento, o ensanchamiento de los taps. Este toma en cuenta la potencia relativa como también sus demoras, siendo así un mejor indicador del funcionamiento del sistema que otros parámetros, definido como:

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{P_T} \sum_{i=1}^n P_i \tau_i^2 - \tau_0^2}$$

Esta cantidad indica que la longitud del camino actual está definida sólo por la demora de los caminos relativos.

La demora de ensanchamiento (delay spread) RMS es un buen indicador del funcionamiento de la tasa de error del sistema para ensanchamiento moderado con la duración de un símbolo. Si el delay spread RMS es mayor que la duración de un símbolo, habrá interferencia intersímbolos (ISI) significativa.

### 5.3 RAKE RECEIVER.

En las señales de espectro ensanchado de secuencia directa (DS-SS-SSB), la información es transmitida en un ancho de banda amplio que es necesario debido a la tasa de bits, por medio de la multiplicación de los bits desde la fuente por una señal código a una tasa más rápida llamada tasa de chip. Si cada usuario en un sistema móvil transmite en un mismo ancho de banda pero usa diferente código de ensanchamiento, es prioritario que dichos códigos tengan baja correlación cruzada (idealmente deberían ser ortogonal) con el fin de separar a los usuarios en el receptor haciendo uso de la multiplicación de la señal de entrada al receptor por una réplica sincronizada del código de ensanchamiento para un usuario determinado. Este proceso fue ilustrado en el capítulo 3.

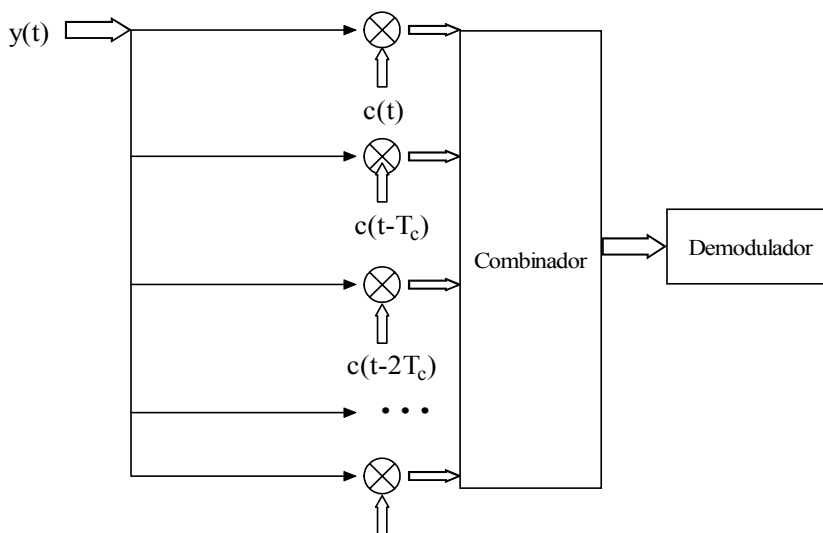
Cuando el canal es de banda ancha, múltiples réplicas de las señales de cada usuario son recibidas, y esto destruye las propiedades de ortogonalidad entre los códigos si las demoras son significativas comparadas con la simple duración de un chip. Esto es cercano a lo que ocurre si la tasa de chips es más grande comparada con el ancho de banda coherente del canal.

En tales situaciones, una estructura alternativa del receptor debe ser usado, lo cual se conoce como Rake Receiver. El canal de banda ancha es representado con demoras entre taps de un periodo de chip  $T_c$ , tal como se muestra en la figura 5.5. El Rake Receiver se muestra en la figura 5.6, en el cual se multiplican varias copias de la señal recibida por versiones del código de ensanchamiento, desplazados por múltiplos de  $T_c$ . Esto permite recobrar los componentes de la señal original (tasa de bit) y recombinarlos, pero con un desplazamiento en el tiempo debido a que el canal fue removido. Cada una de estas ramas se desplaza en el tiempo, por lo cual se conoce como el receptor de ramificación. Idealmente, el combinador tiene la máxima relación

de combinación de las ramas, produciendo una señal de salida para el demodulador la cual tiene el máximo posible de relación de señal a ruido.

En la práctica la señal debe ser sometida a demoras en el tiempo, además que de código, lo cual logra un funcionamiento más eficiente en algunas topologías. Adicionalmente, el receptor puede ser limitado a sólo un pequeño número de ramas, las cuales serían usadas para desplazar el tiempo a los taps que contienen mayor energía, de acuerdo a las estimaciones dadas para el canal.

**Figura 5.6: Rake Receiver para demodulación de DS-CDMA en canales de banda ancha.**



#### 5.4. MODELOS DE RADIO PROPAGACIÓN UTILIZADOS PARA LA REALIZACIÓN DE SIMULACIONES.

En CDMA, se asume que hay un número de “canales” limitado por el número de códigos disponibles. Este número teórico de canales está limitado por la interferencia entre los usuarios y por el problema de “cerca-lejos”. Basándonos en esta suposición, se realizarán simulaciones de predicción de

los niveles de potencia haciendo uso de modelos diseñados para TDMA. (Este proceso se realizará en el siguiente capítulo). De acuerdo a esto, a continuación se hará una introducción a los modelos utilizados en dichas simulaciones Walfisch–Bertoni y COST231Walfisch–Ikegami modificado UIS.

#### 5.4.1. Modelo Walfisch – Bertoni.

El modelo Walfisch – Bertoni se considera como el caso límite del modelamiento de terreno plano cuando el número de edificio es suficiente para establecer el campo, esto es  $n \geq n_s$ . El proceso de múltiple difracción fue investigado en este modelo usando la evaluación numérica de la integral de Kirchhoff – Huygens y una fórmula de ley de potencia apta para el resultado del campo establecido. El modelo Walfisch – Bertoni fue el primero en demostrar que la múltiple difracción en los edificios se tiene en cuenta para la variación de la distancia con el rango, lo cual se puede evidenciar en las mediciones experimentales.

La aproximación del campo establecido es:

$$A_{settled}(t) \approx 0.1 \left( \frac{\alpha}{0.03} \sqrt{\frac{w}{\lambda}} \right)^{0.9} = 0.1 \left( \frac{-t}{0.03} \right)^{0.9}$$

Esto es sólo válido para  $0.03 \leq t \leq 0.4$ . Para rangos mayores, se puede reemplazar:

$$t \approx -\alpha \sqrt{\frac{\pi w}{\lambda}} \approx -\frac{h_b - h_m}{r} \sqrt{\frac{\pi w}{\lambda}}$$

De lo anterior se determina que  $L_{settled} \propto r^{-1.8}$ . Las pérdidas en el espacio libre son proporcionales a  $r^{-2}$ , por lo tanto este modelo predice las pérdidas por propagación totales proporcionalmente a  $r^{-3.8}$ , el cual es cercano a la ley

$r^{-4}$  que es comúnmente usada en los modelos empíricos y sale como resultado de los análisis realizados de mediciones experimentales. En este modelo de radio propagación, es usada una simple aproximación filo de cuchillo con una reflexión desde los edificios, para tener en cuenta la difracción final desde los edificios. El modelo completo es expresado como:

$$L_{ex} = 57.1 + L_A + \log(f_c) + 18 \log R - 18 \log(h_b - h_0) - 18 \log \left[ 1 - \frac{R^2}{17(h_b - h_0)} \right]$$

donde,

$$L_A = 5 \log \left[ \left( \frac{w}{2} \right)^2 + (h_0 - h_m)^2 \right] - 9 \log w + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{2(h_0 - h_m)}{w} \right] \right\}$$

El uso de la aproximación de campo establecido requiere que un gran número de edificios esté presente, particularmente cuando  $\alpha$  es muy pequeño. A pesar de esta limitación, el modelo Walfisch – Bertoni fue el primero en tener en cuenta la variación de las pérdidas por trayectoria usando suposiciones físicas reales.

#### 5.4.2. Modelo COST / 231 Walfisch – Ikegami.

El modelo Walfisch – Bertoni ha sido combinado con el modelo de Ikegami para tener en cuenta la difracción bajo el nivel de la calle y algunos factores de corrección[28].

Para la condición sin línea de vista, el campo total está dado por:

$$L = L_F + L_{msd} + L_{sd}$$

donde  $L_F$  son las pérdidas en el espacio libre,  $L_{msd}$  tiene en cuenta multiples difracciones por filos de cuchillo en el techo de los edificios y  $L_{sd}$  tiene en cuenta un simple proceso de difracción y dispersión bajo el nivel de la calle. Se establece un mínimo valor de  $L_F$  en el caso de que los demás términos sean negativos. Los términos individuales son:

$$L_{sd} = -16.9 + 10 \log f_c + 10 \log \left( \frac{(h_0 - h_m)^2}{w_m} \right) + L(\phi)$$

donde  $w_m$  es la distancia entre los lados del edificio sobre cualquier lado de la calle en donde se encuentra el móvil (típicamente  $w_m = w/2$ ), y el termino final se tiene en cuenta para la orientación de la calle con el ángulo  $\phi$ , así:

$$L(\phi) = \begin{cases} -10 + 0.354\phi & \dots\dots\dots 0^\circ < \phi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35^\circ) & \dots\dots\dots 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\phi - 55^\circ) & \dots\dots\dots 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases}$$

Finalmente, el termino que tiene en cuenta la difracción sobre el techo de los edificios está dado por:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log R + k_f \log f_c - 9 \log w$$

donde,

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log [1 + (h_b - h_0)] & \dots\dots\dots h_b > h_0 \\ 0 & \dots\dots\dots h_b \leq h_0 \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \dots\dots\dots h_b > h_0 \\ 54 - 0.8(h_b - h_0) & \dots\dots\dots R \geq 0.5 \text{ Km} \dots\dots h_b \leq h_0 \\ 54 - 0.8 \frac{(h_b - h_0)R}{0.5} & \dots\dots\dots R < 0.5 \text{ km} \dots\dots h_b \leq h_0 \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \dots\dots\dots h_b > h_0 \\ 18 - 15 \frac{(h_b - h_0)}{h_0} & \dots\dots\dots h_b \leq h_0 \end{cases}$$

$k_f = -4 + 0.7 \left( \frac{f_c}{925} - 1 \right)$  para ciudades de tamaño mediano y áreas suburbanas con densidad media de árboles.

$k_f = -4 + 1.5 \left( \frac{f_c}{925} - 1 \right)$  para centros metropolitanos.

El término  $k_a$  representa el incremento de path loss debido a una antena de la BS ubicada a una altura menor que 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.

Para la realización de un trabajo aproximado, en el caso en que las características de los edificios y las calles son desconocidas, los siguientes valores pueden ser utilizados:

$h_0$  es igual a  $3n$  para techos planos, y  $3n + 3$  para techos inclinados, donde  $n$  es el número de pisos del edificio y  $W=20 - 50$  m,  $d_m = w / 2$ ,  $\phi = 90^\circ$ .

Este modelo es aplicable para  $800MHz \leq f_c \leq 2000MHz$ ,  $4m \leq h_b \leq 50m$ ,  $1m \leq h_m \leq 3m$ , y  $0.5km \leq R \leq 5km$ .

#### 5.4.3. Modelo COST231 / Walfisch – Ikegami modificado para terreno irregular (UIS).

La modificación realizada al modelo COST231 / Walfisch – Ikegami para terreno irregular [28], se basa en las ecuaciones mencionadas anteriormente para el modelo COST231 / Walfisch – Ikegami para la estimación del path loss, y considera además una modificación para las pérdidas debidas a la difracción final, proveniente del techo del último edificio, y la reflexión de la pared del edificio siguiente, resumida en  $L_{rts}$ . De esta forma la constante de la ecuación para la estimación de la difracción y dispersión bajo el nivel de la calle  $L_{sd}$  pasaría de ser -16.9 a ser -8.2, obteniéndose así:

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

donde,

$$\Delta h_{Mobile} = h_b - h_0$$

donde  $w$  se expresa en metros,  $f$  en megahertz y  $\Delta h_{Mobile}$  en metros. Una descripción detallada de las tesis consideradas para esta modificación se encuentra en [28].

## **5.5 COMO SOBRELLEVAR LOS INCONVENIENTES DEL CANAL DE BANDA ANCHA.**

Debido a la naturaleza del canal de banda ancha, se pueden presentar grandes inconvenientes en el modelamiento del mismo y por consiguiente presentar grandes distorsiones en la señal recibida. Con el fin de solucionar estas situaciones, se han desarrollado algunos métodos que son utilizados ampliamente en el diseño de sistemas de telefonía celular de banda ancha, tales como:

- **Antenas Direccionales:** Este tipo de antenas permiten que la energía transmitida hacia los dispersores sea reducida y por lo tanto, se reduce el problema de cerca-lejos. Esto es aplicado en los sistemas de telefonía celular instalados en Bucaramanga, donde se utilizan antenas direccionales haciendo una sectorización de las celdas.
- **Celdas Pequeñas:** Limitando el tamaño de la celda, el máximo retardo de ensanchamiento es reducido. Para el caso de Bucaramanga es de aproximadamente 1Km. Esto se verificó con las campañas de medidas realizadas en la zona de estudio, pues se pudo comprobar niveles de potencia de  $-100$  dB a esa distancia. De acuerdo a lo anterior, los retardos en espacio libre son del orden de:

$$t = \frac{1Km}{3*10^8 m/s} = 3.33\mu s .$$

- **Diversidad:** Con este método se hace mejor uso de la energía de la señal reduciendo el nivel de desvanecimiento de la misma. De esta forma, la relación señal a ruido para una tasa de error de bit dada, se reduce y el error de piso disminuye, aunque no es removido totalmente. En Bucaramanga se comprobó que no se utiliza diversidad espacial en las celdas CDMA, pero se mantiene la macrodiversidad en las zonas donde más de una celda atiende a los usuarios al mismo tiempo.
- **Ecuilibradores:** Los ecualizadores transforman el canal de banda ancha en uno de banda angosta, haciendo uso de un filtro adaptativo para achatar la respuesta en frecuencia del canal o realizando construcción de la energía usada en los taps retardados. Con la construcción de la energía usada, el funcionamiento del canal de banda ancha puede ser mejor que el de banda angosta.
- **Tasa de Datos:** Una simple forma de reducir los inconvenientes presentados con el canal de banda ancha es disminuir la tasa de datos modulada.

## **6. PROCEDIMIENTO DE MEDICIONES, REALIZACIÓN DE CAMPAÑAS DE MEDIDAS, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

### **6.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presenta la metodología utilizada en la toma de medidas de potencia e intensidad de campo eléctrico en ambientes exteriores con características de terreno escarpado para las comunicaciones móviles de banda ancha (específicamente tecnología CDMA). Así mismo se aplicará este procedimiento para la adquisición de datos en la zona de cobertura de las estaciones base de la empresa Bellsouth ubicadas en el barrio Provenza y Real de Minas en la ciudad de Bucaramanga, comprendiendo los barrios Provenza, San Luis, Bucaramanga y la Victoria.

Como parte de investigación del grupo Radio GIS y para verificar los datos experimentales obtenidos en las campañas de medidas se hizo uso de la herramienta de planificación celular CellView desarrollada por el Grupo de Comunicaciones Móviles (GCM) del Departamento de Comunicaciones (DCOM) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) basado en la plataforma SIG (Sistema de información Geográfica) ArcView. Por último se analizarán los datos obtenidos en las campañas de medidas realizadas con el sistema integrado TCI del Ministerio de Comunicaciones Dirección territorial Bucaramanga y los celulares Kyocera 1135 y Phantom 3G CDMA, en modo de ingeniería.

### **6.2 PROCEDIMIENTO DE MEDIDAS**

Los procedimientos empleados para realizar mediciones de propagación de señales electromagnéticas no son triviales. Para la utilización práctica de los resultados obtenidos de una medición, interesan los desvanecimientos lentos

o de gran escala. En consecuencia, cuando se realizan mediciones se busca eliminar el efecto de los desvanecimientos rápidos o de pequeña escala. Los desvanecimientos rápidos se producen sobre distancias comparables con  $\lambda$ , la longitud de onda de la señal, [42]. Para eliminar los efectos de desvanecimientos rápidos, el procedimiento estándar usado por los investigadores ha sido determinar el nivel de señal recibido mediante el promedio de múltiples mediciones sobre un sector. El tamaño del sector considerado por distintos autores varía. Rappaport, [42], mantiene el transmisor en un punto fijo y desplaza el receptor sobre una distancia de  $6 \lambda$ , para realizar 128 mediciones, que luego son promediadas. Estas medidas son luego confirmadas utilizando técnicas de banda ancha. Seidel [43], en cambio, mantiene el transmisor en un punto fijo y desplaza el receptor sobre una distancia de  $20 \lambda$  en forma longitudinal, para obtener un número significativo de mediciones que son promediadas para configurar un punto de medición. Es importante considerar que el procedimiento de medición debe ser automatizado, ya que exige tomar muchas mediciones para ser luego promediadas. Una alternativa para realizar mediciones manualmente es obtener menos puntos.

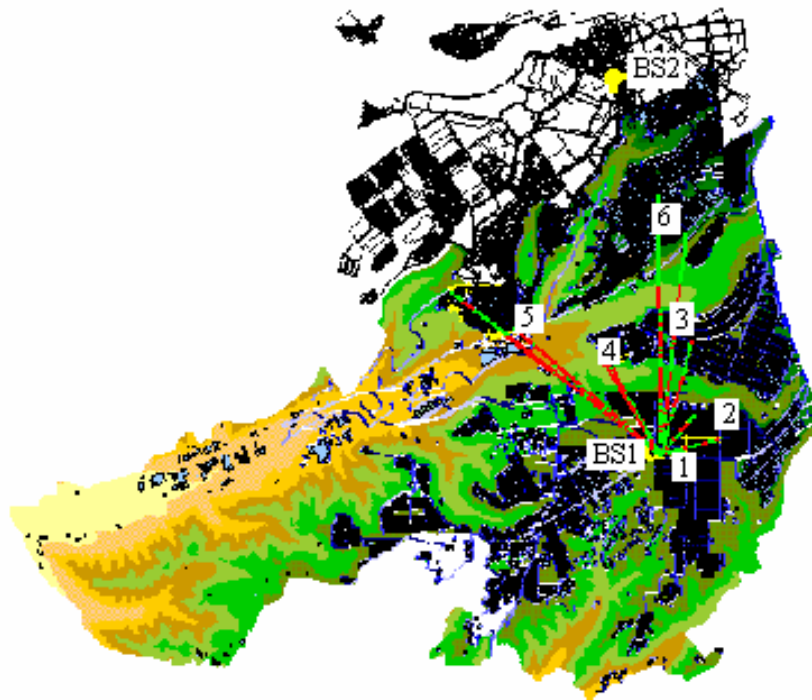
En el contexto de la planificación de celdas y predicción de su área de cobertura, se desea desarrollar la habilidad de realizar mediciones para obtener resultados que garanticen como mínimo un determinado nivel de calidad de la señal recibida. Interesa poder determinar la mejor ubicación de una antena base, establecer de antemano cuánta atenuación experimentará la señal al propagarse en un espacio libre, sortear obstáculos, reflejarse en ellos y difractarse en otros. El procedimiento a seguir para confirmar mediante mediciones experimentales la intensidad de la señal recibida por un móvil en una celda celular con tecnología CDMA de banda ancha se propondrá a continuación:

### 6.2.1. Determinar la zona a investigar con claridad.

Seleccionar la zona en la cual se va a realizar el estudio que presente las características necesarias para el desarrollo de la investigación. Para propósitos de este proyecto y como se puede apreciar en la figura 6.1.a se determinó la zona comprendida entre los barrios Provenza (Rutas 1 y 2), San Luis (Rutas 3 y 4), Bucaramanga (Ruta 5) y la Victoria (Ruta 6) que presentan características propias de terreno escarpado. Se puede apreciar que consecuente al trabajo realizado en [28] se añadió la zona correspondiente al barrio Real de minas para ubicar la estación base BS2. La estación base BS1 ubicada en el barrio Provenza ya ha sido utilizada en investigaciones anteriores [28]. En la figura 6.1.b se observa la sinuosidad del terreno para la zona de estudio.

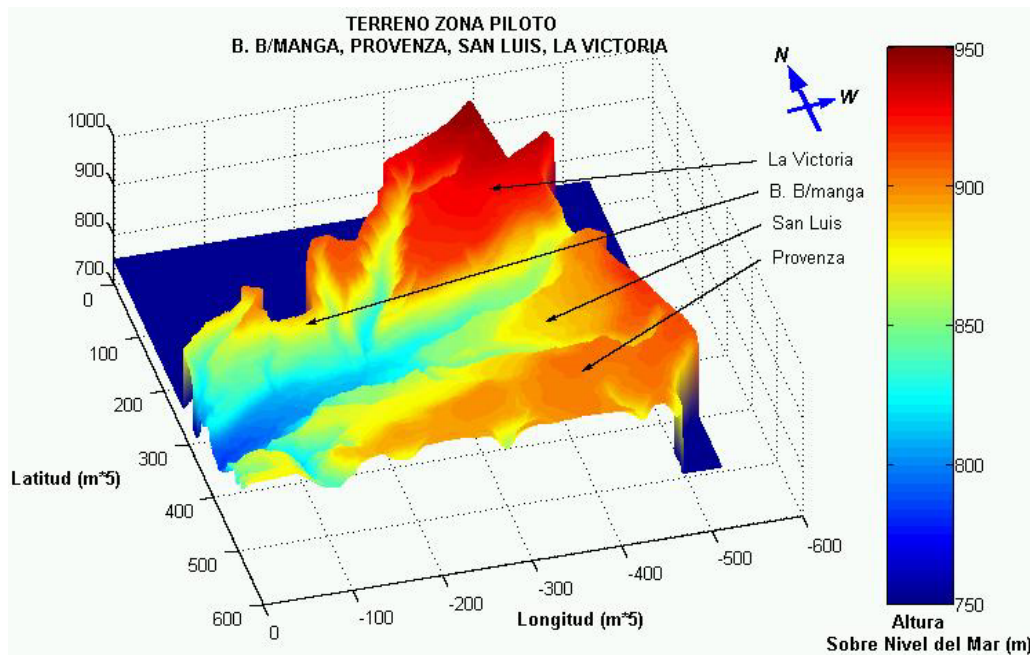
**Figura 6.1 Parámetros físicos de la zona piloto**

**a) Zona de cobertura de las dos celdas CDMA en Bucaramanga**



**Fuente: Herramienta de planificación celular CellView.**

**b) Constitución geográfica del terreno dentro de la zona piloto**



**Fuente: Cobertura para sistemas móviles celulares en entorno urbano escarpado, García A. Paolo, 2002.**

### 6.2.2 Determinar la técnica a ser utilizada en las mediciones para el cálculo de potencia.

Existen diferentes modos para medir potencia en banda ancha, un ejemplo es la técnica de medición que consiste en enviar un pulso de radiofrecuencia de un ancho de unos pocos nanosegundos desde el transmisor y detectar en el extremo receptor los múltiples pulsos que son producto de la multitrayectoria. Presenta la ventaja inherente que permite identificar las contribuciones a la señal recibida, pero su mayor inconveniente es que debido a que se trata de una técnica de banda ancha, requiere de equipamiento apropiado en el transmisor, en el receptor y antenas de banda ancha para obtener una buena resolución. La medición de un pulso de radiofrecuencia de unos cuantos nanosegundos de duración, tiene el inconveniente de que la potencia media transmitida y en consecuencia también la recibida, se ve disminuida por el factor que impone el ciclo de trabajo del pulso enviado. Una alternativa que evita este problema es el uso de la técnica de espectro ensanchado [42].

Para efectos del presente proyecto se han realizado las mediciones haciendo uso del sistema integrado TCI del Ministerio de Comunicaciones (Dirección territorial Bucaramanga), el cual mide la intensidad de campo eléctrico (en dB  $\mu$ V/m) y soporta un ancho de banda máximo de la señal a medir de 100 MHz, rango suficiente para medir la señal CDMA cuya portadora está ubicada en 881.525 MHz con un ancho de banda de 1.25 MHz.

Paralelo a éste se tomaron medidas con dos celulares Kyocera 3G CDMA para hacer lo más real posible este proyecto, ya que al medir la potencia teniendo en cuenta un canal codificado se asemeja a TDMA y el algoritmo realizado en CellView está enfocado a esta tecnología. Dichos equipos se configuraron en el modo de ingeniería para visualizar la potencia de la señal recibida. Con esto es posible hacer una comparación con las mediciones realizadas con el sistema integrado TCI, para lograr una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.

Al realizar las mediciones en espacio libre es necesario la referenciación geográfica exacta de los datos obtenidos, para lo cual se utilizó un sistema de posicionamiento global (GPS), el cual hace parte del sistema TCI, que proporciona las coordenadas latitudinales y longitudinales de la ubicación de los equipos receptores empleados en la toma de datos. Esto es muy importante en la tabulación de los datos para su posterior análisis haciendo uso del software de planificación celular CellView.

### **6.2.3 Realización de las mediciones.**

Una vez ejecutados los pasos anteriores, se lleva a cabo la toma de datos en la zona seleccionada, que para este proyecto fue la zona comprendida en los barrios Provenza, San Luis, Bucaramanga y la Victoria. Es de gran importancia seleccionar las rutas que cumplan con las condiciones geográficas establecidas para la realización del estudio y contar con los

equipos adecuados que garanticen el cumplimiento de los parámetros de la señal a medir (principalmente el ancho de banda de la señal y la frecuencia de la portadora).

#### **6.2.4 Utilizar herramientas que permitan la verificación de los resultados obtenidos.**

Realizar un estudio geográfico del terreno a investigar mediante herramientas de software que permitan representar digitalmente la zona en cuestión y simular el comportamiento de las ondas electromagnéticas en la misma, con el objetivo de corroborar los datos obtenidos experimentalmente. En el presente proyecto se toma como base el estudio geográfico realizado en [28] donde se utilizó la plataforma SIG con el software de planificación celular CellView con el fin de realizar una simulación de área de cobertura de dos estaciones base. Para llevar a cabo la simulación se requirieron cinco archivos de entrada, los cuales son:

- Alturas de los edificios (en metros).
- Alturas del terreno, con respecto al nivel del mar (en metros).
- Orientación de las vías (en grados).
- Patrón de radiación de la antena para cálculos de cobertura dentro del CellView (en dB).
- Parámetros de simulación, estos son:
  - PIRE (Power Isotropic Radiated Effective) del transmisor.
  - Ganancia de la antena del receptor.
  - Frecuencia utilizada.
  - Altura del transmisor y receptor.
  - Cantidad de filas y columnas de los grid de análisis.
  - Número de la fila y columna de la posición del transmisor.
  - Resolución de celda en el grid.
  - Dirección en disco del patrón de radiación de la antena.

- Corrección de azimut de la antena y el downtilt de la misma.

Todos los archivos indicados anteriormente son documentos de texto que se han creado de forma diferente. Para mayor información consultar en [28].

### **6.2.5 Tabulación y Análisis de datos.**

Una vez obtenidos los datos, se efectúa el proceso de ordenamiento de los mismos con el fin de lograr una mejor interpretación y evitar posibles errores de apreciación al realizar el análisis. Se hace una comparación de los datos de campo con los simulados para llevar a cabo un estudio estadístico que arrojará resultados definitivos para propósitos de este proyecto.

## **6.3 REALIZACIÓN DE CAMPAÑAS DE MEDIDAS**

En las campañas de medidas realizadas en el presente proyecto se seleccionaron los barrios citados en la sección 6.2.1 con sus rutas respectivas. Se tomó un dato aproximadamente cada 6 metros, distancia mínima a la cual se podía desplazar el sistema Integrado TCI, ya que está ubicado dentro de una plataforma móvil (Camioneta FORD F-350). De igual forma, para el celular CDMA se determinó el nivel de señal en el doble de puntos tomados (mediciones cada 3 metros) comparados con el TCI.

Cabe anotar que el sistema TCI toma automáticamente entre 1000 a 1200 medidas de la potencia recibida en un punto determinado y luego las promedia (este proceso tarda dos minutos veinte segundos), ajustando el equipo para que arroje un valor de bastante confiabilidad. Esto mitiga los efectos a pequeña escala (fast fading) en las medidas por punto (ver sección 6.2). Aquí no hay que preocuparse por pérdidas en el cableado y antena como sucedía con el equipo miniport receiver de propiedad del ministerio (utilizado en [28]), el cual no fue apto para este proyecto por no tener el ancho de banda disponible para medir CDMA (solo alcanzaba los 200 KHz) y

por tener que hacer las mediciones manualmente implicando pérdida de tiempo y exactitud en las mediciones de campo.

La importancia del equipo TCI radica en que al medir la intensidad de potencia en todo el espectro de CDMA, es decir para todos los usuarios que posea el sistema, se convierte en una herramienta poderosa para regularizar las irradiaciones provenientes de las estaciones base y así poder determinar si de algún modo pueden ser perjudiciales para la salud humana. En este proyecto se utiliza este equipo como punto de comparación con el celular nombrado anteriormente.

Al introducir los datos en el Cellview estos tendrán una resolución de celda en el grid que corresponde a la distancia por punto escogida para este proyecto por el celular, por lo tanto no hay problema a la hora de hacer simulaciones. Es importante resaltar que el rango de frecuencias utilizado para CDMA corresponde a dos portadoras consecutivas cada una con un ancho de banda de 1.25 MHz, como se muestra en la figura 6.2. Para el rango de frecuencia utilizado en Colombia para CDMA (de 880.9 MHz a 883.375 MHz), la longitud de onda  $\lambda$  se cálculo de la siguiente forma:

$$\lambda = \frac{c}{f};$$

Donde  $c$  = velocidad de la luz en m/s.

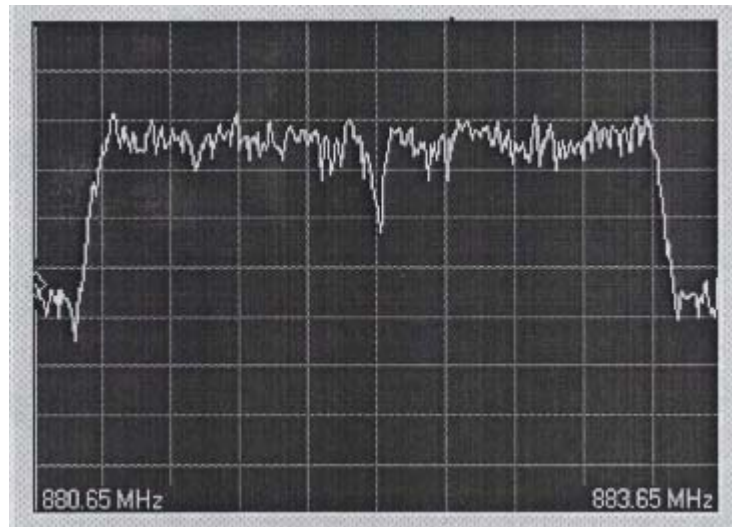
$f$  = frecuencia de la señal en Hz.

$$\text{Entonces: } \lambda_1 = \frac{3 * 10^8}{880.9 * 10^6} = 34.05 \text{ cm ; y}$$

$$\lambda_2 = \frac{3 * 10^8}{883.375 * 10^6} = 33.96 \text{ cm.}$$

Lo cual quiere decir que la longitud de onda comprende un rango de 33.96 cm a 34.05 cm. Al hacer las medidas a 3 metros se eliminan los efectos de pequeña escala, ya que esta distancia es de 8.81 veces mayor que la longitud de onda utilizada para este proyecto (34.05 cm).

**Figura 6.2. Portadoras de CDMA, estación base Barrio Provenza.**



**Fuente: Ministerio de Comunicaciones Dirección territorial Bucaramanga. Sistema Integrado TCI**

Para llevar a cabo las mediciones de campo, la frecuencia para la estación base en estudio se sintonizó a 881.525 MHz. Teniendo en cuenta que las mediciones obtenidas con el equipo TCI están dadas en  $dB \mu V/m$ , fue necesaria la conversión de este valor a dBm para obtener una comparación directa con las mediciones realizadas con el celular CDMA y las simulaciones efectuadas con el CellView. Con este fin se utilizó la ecuación dada por William C. Y. Lee en “*Mobile Cellular Telecommunicatios Systems*”<sup>3</sup>.

$$P_r[dBm] = E(dB\mu V / m) - 113dB + 10Log\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \quad (6.1)$$

<sup>3</sup> William C. Y. Lee, *Mobile Cellular Telecommunicatios Systems*, USA: McGraw-Hill Book Company, 1989.

Los valores en dBm calculados a partir de los datos obtenidos con el equipo móvil TCI que se encuentran en las Tablas A.1, A.2, A.3 y A.4 del Anexo A se obtuvieron aplicando ésta ecuación. Estas tablas muestran los resultados promedio para cada punto de todas las mediciones realizadas en los cuatro barrios y las seis rutas escogidas. La demostración de esta ecuación se presenta a continuación. Cabe anotar que esta relación corresponde a un dipolo pequeño y se puede catalogar como una aproximación ya que el equipo TCI funciona con medidas isotrópicas que usa un dipolo más grande.

$$P_R = \frac{E^2 * \lambda^2}{4\pi^2 * R_L} \quad (6.2)$$

Donde  $R_L = 50\Omega$ , Valor típico del equipo Miniport Receiver utilizado en [28].

Se necesita de la potencia recibida en dBm:

$$P_{R\text{ dBm}} = 10 \log \left( \frac{E^2 * \lambda^2 * (10^{-6})^2}{4\pi^2 * R_L * 10^{-3}} \right) \quad (6.3)$$

Reemplazando para  $E$  en  $\mu V / m$ :

$$P_{R\text{ dBm}} = 10 \log(E^2) + 10 \log \left( \frac{(10^{-6})^2}{4 * R_L * 10^{-3}} \right) + 10 \log \left( \frac{\lambda^2}{\pi^2} \right) \quad (6.4)$$

Teniendo en cuenta que

$$10 \log(E^2) = 20 \log(E) \quad \text{Si } E \text{ está en } \mu V / m$$

$$\text{al introducirle la unidad dB queda así: } 20 \log(E) = E_{dB\mu V / m} \quad (6.5)$$

Entonces la ecuación queda demostrada:

$$P_r[dBm] = E(dB\mu V / m) - 113dB + 10\text{Log}\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \quad (6.6)$$

Despejando

$$P_{R\text{ dBm}} = E_{dB\mu V / m} - 113.01dBm - 10\log(\pi^2) + 20\log(\lambda) \quad (6.7)$$

Finalmente:

$$P_{R\text{ dBm}} = E_{dB\mu V / m} - 122.95\text{ dBm} + 20\log(\lambda) \quad (6.8)$$

Para hacer más exacta la ecuación 6.8 y buscando un acercamiento a las características isotrópicas del equipo TCI, se harán las siguientes consideraciones y ajustes a la fórmula.

Para el espacio libre

$$S = \frac{E^2}{Z} \quad (6.9)$$

La potencia recibida será

$$P_R = \frac{E^2 * (10^{-6})^2}{2 * 377\Omega} * A_{eff} \quad (6.10)$$

$$\text{Donde } A_{eff} = G_R * \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \quad (6.11)$$

Para expresar  $E$  en  $\mu V / m$ :

$$P_R = \frac{E^2 * (10^{-6})^2}{8 * 377\Omega * \pi} * \lambda^2 * G_R \quad (6.12)$$

Para medidas Isotrópicas  $P_{RI}$  (Como lo hace la unidad móvil TCI del ministerio)

$$P_{RI} = \frac{P_R * L_R}{G_R} \quad (6.13)$$

Reemplazando

$$P_{RI} = \frac{E^2 * (10^{-6})^2 * \lambda^2 * G_R * L_R}{8 * 377 \Omega * \pi * G_R} \quad (6.14)$$

Eliminando  $G_R$  y despreciando  $L_R$  si el equipo está calibrado (El equipo TCI del ministerio cumple con los requisitos de calibración) y pasando la potencia isotrópica recibida a dBm

$$P_{RI dBm} = 10 \log \left( \frac{E^2 * (10^{-6})^2 * \lambda^2}{8 * 377 \Omega * 10^{-3} * \pi} \right) \quad (6.15)$$

Por lo tanto, la ecuación final es

$$P_{RI dBm} = E_{dB \mu V / m} - 129.7658 dBm + 20 \log (\lambda) \quad (6.16)$$

En el anexo A se describen los valores de las medidas de campo hechas por el equipo TCI en dBm, resultados de la ecuación 6.16. La diferencia entre estas fórmulas corresponde a 6.8138 dBm producto de la resta entre las constantes 129.7658 y 122.952 dBm. Por lo tanto se puede decir que la ecuación de Lee (6.8) y la modificada en este trabajo (6.16) difieren en forma constante, cambiando solamente datos referentes al offset en el análisis de resultados (ver sección 6.4).

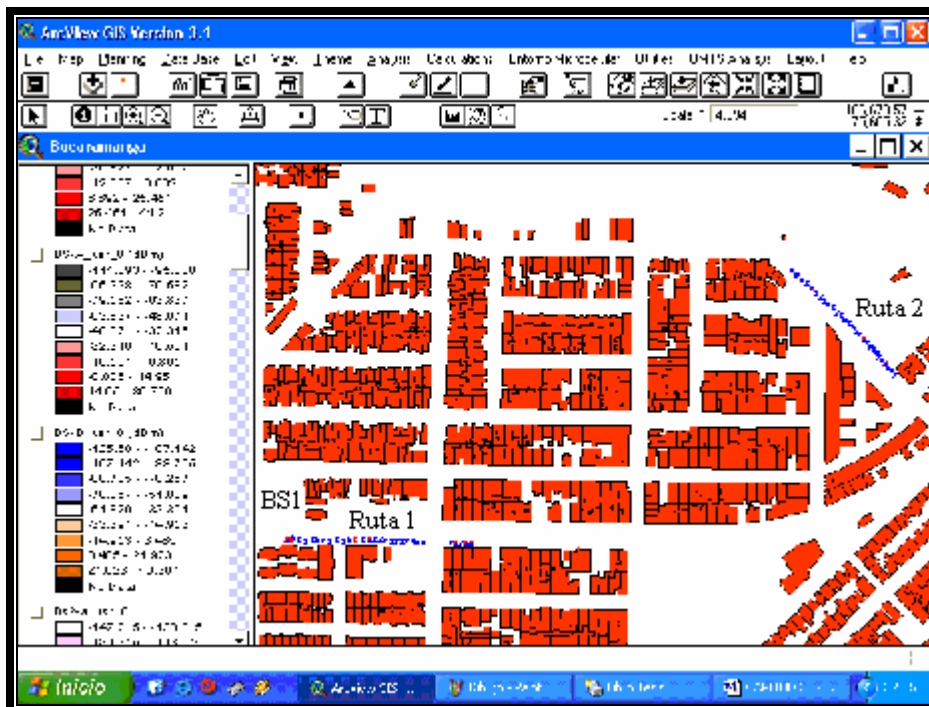
Al comparar las medidas de campo hechas con el equipo TCI para ambas fórmulas de conversión expuestas anteriormente con las simulaciones (ver

anexo B), no cambiarán valores estadísticos como la desviación estándar sino valores lineales como el promedio, la mediana, y la diferencia tanto máxima como mínima.

### 6.3.1. Cobertura para la realización de mediciones

Considerando la zona seleccionada para la realización de mediciones y teniendo en cuenta que el estudio se encamina hacia el análisis sobre terreno escarpado, es importante destacar las características propias de cada ruta (están representadas por puntos azules en la simulación). Para el Barrio Provenza, se eligió la ruta N° 1 (Figura 6.3) próxima a la estación base con condiciones topográficas uniformes (terreno plano) y la ruta N° 2 (Figura 6.3) que presenta trayecto cóncavo en su superficie sin Línea de Vista (NLOS) hacia la BS1, debido a la presencia de Edificios en su trayecto.

Figura 6.3. Medidas de campo Barrio provenza

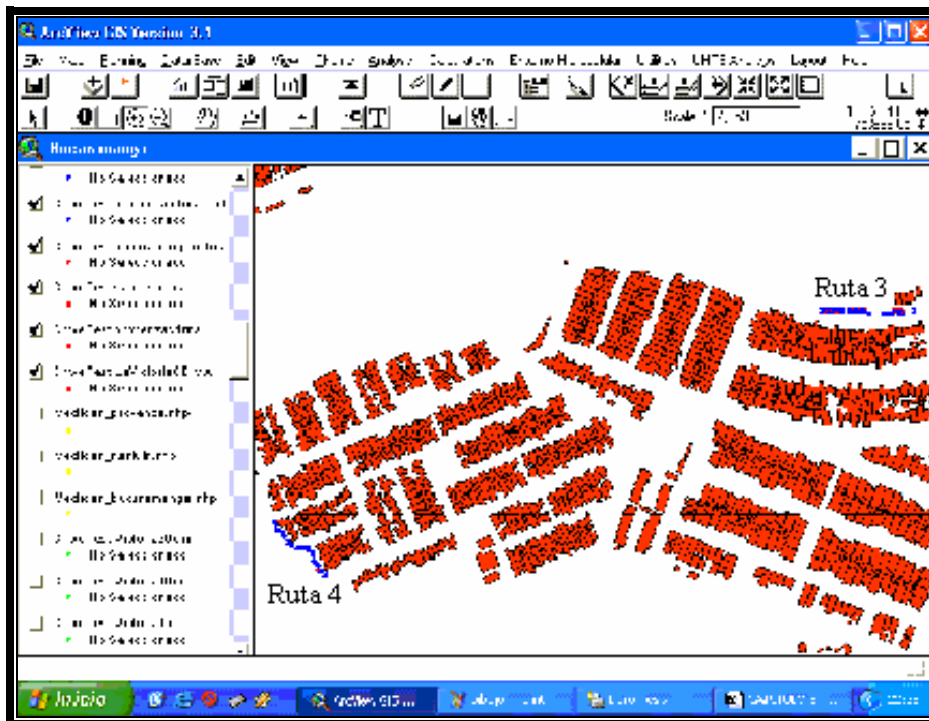


Fuente: Herramienta de planificación celular CellView.

De igual manera, para el barrio San Luis, importante para la realización de este estudio por estar ubicado sobre un cañón, se realizó la toma de datos en dos sectores. La ruta N° 3 (figura 6.4) se destaca por su pronunciada pendiente y su condición parcial de NLOS hacia BS1, ya que sólo sobre un tramo del trayecto existía línea de vista. Cabe resaltar que ésta ruta presenta las condiciones favorables para realizar el análisis de Shadowing, puesto que presenta puntos equidistantes a la estación base de Provenza.

La ruta N° 4 (figura 6.4) corresponde a un terreno plano ubicado sobre el cañón con la particularidad de presentar condiciones topográficas de tipo semi-urbano (presencia de árboles en dirección a la estación base).

**Figura 6.4. Medidas de campo Barrio San Luis**



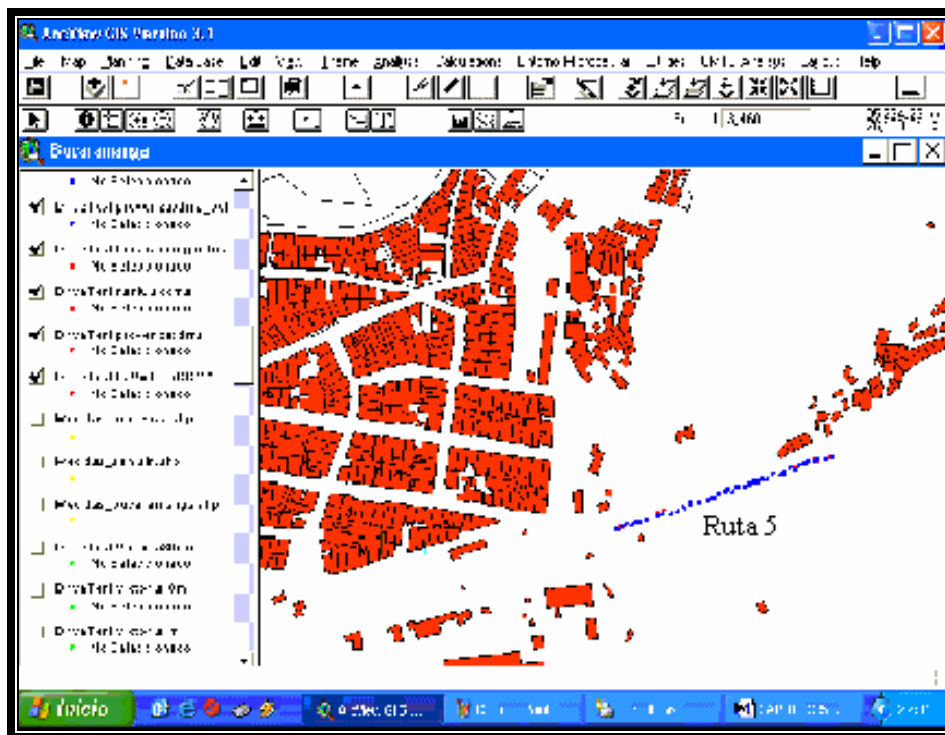
**Fuente: Herramienta de planificación celular CellView.**

Para el barrio Bucaramanga, se procedió con la adquisición de datos por la autopista que lo delimita (Figura 6.5). La ruta No 5 caracterizada por presencia de una pequeña montaña en parte de su trayecto, con lo cual sólo

se tenía la condición de línea de vista (LOS) después de éste obstáculo. Esta ruta, levemente inclinada, fue importante para determinar la intensidad de la señal después de atravesar el cañón sobre el cual está ubicado el barrio San Luis.

Además se puede verificar en el análisis de resultados si la señal aumenta al sortear el obstáculo (montaña), ya que después de éste, la distancia entre el móvil y la estación base de Provenza solo es separada por el espacio libre.

**Figura 6.5. Medidas de campo Barrio Bucaramanga**



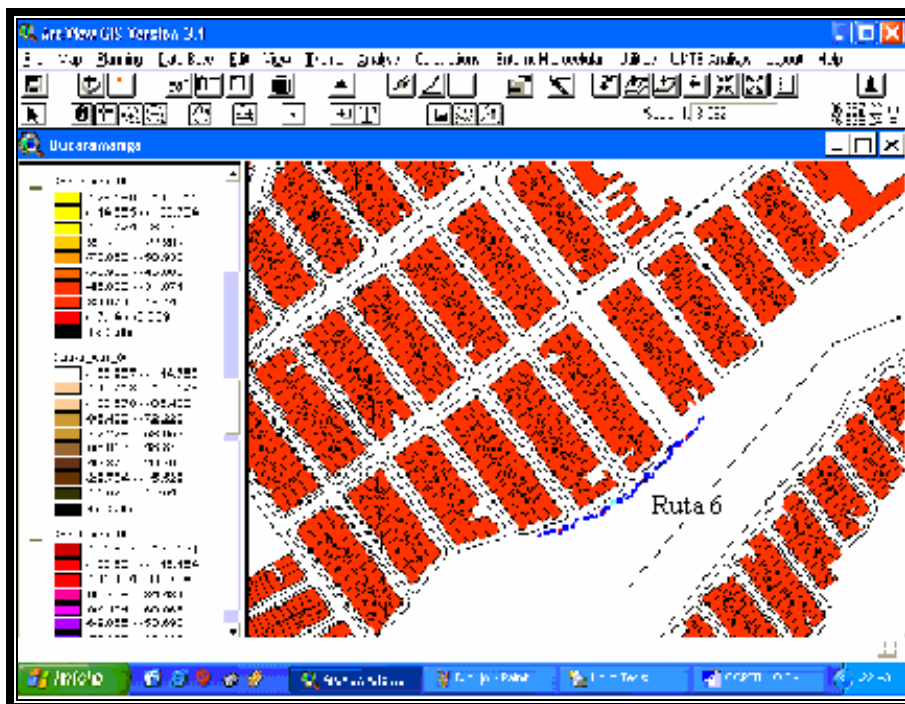
**Fuente: Herramienta de planificación celular CellView.**

Por último, la ruta No 6 en el Barrio La Victoria, presenta terreno plano con condición de línea de vista (figura 6.6.) para la BS1 ubicada en Provenza, pero no para la BS2 que muestra una condición opuesta (NLOS). Se caracteriza por estar ubicada en zona de Handover, ya que este barrio se encuentra localizado en un punto equidistante entre la estación base del barrio Provenza y la estación situada en el barrio Real de minas. De igual

forma es importante analizar esta ruta debido a su ubicación paralela a la ruta realizada en el barrio Bucaramanga, pero con mayor elevación.

Cabe anotar que los resultados del análisis de esta ruta servirán para determinar el comportamiento del modelo en zona de traslape entre celdas para sistemas de banda ancha, y así poder definir el desempeño del modelo utilizado en este proyecto para este caso en particular.

**Figura 6.6. Medidas de campo Barrio La victoria**



**Fuente: Herramienta de planificación celular CellView.**

### 6.3.2 Equipos de medición.

- **Sistema Integrado TCI Móvil del Ministerio de Comunicaciones de Colombia Dirección territorial Bucaramanga.**

Se encuentra estratégicamente posicionado en una camioneta Ford F-350 con el fin de llevar a cabo labores de radiolocalización y toma de datos

promedio de densidad espectral de potencia. Ubica su antena receptora a 2.5 m del piso sobre su estructura. Posee un equipo de posicionamiento Global (GPS) y equipos especializados que son de aspecto confidencial de esta entidad del estado. Para mayor información al respecto se recomienda visitar la sede del ministerio de comunicaciones dirección territorial Bucaramanga y allí se dará la información deseada, claro está con previa autorización del director de esta importante entidad.

- **Terminal Móvil Kyocera 1135 3G CDMA.**

Este teléfono celular maneja la tecnología de Acceso Múltiple por División de Código CDMA homologado por la empresa Bellsouth para Colombia.

**Figura 6.7. Terminal Kyocera 1135 3G CDMA**



**Fuente: Autores del proyecto**

Para efectos de este proyecto el celular se situó a una altura de 1.8m dada por la persona que hizo las mediciones de campo. Este equipo muestra la potencia promedio recibida en dBm. Para acceder al modo de ingeniería se marca como si fuera una llamada normal 111111, oprime el botón opción; luego en el menú opciones selecciona Debug y registra la clave 000000 entrando al menú Field debug. Allí toma la opción pantalla de debug –

Activar. Para mayor información en aspectos tanto técnicos como de usuario de este equipo móvil entrar en la página Web de Kyocera: [www.kyocera-wireless.com](http://www.kyocera-wireless.com).

### **6.3.3 Estaciones base**

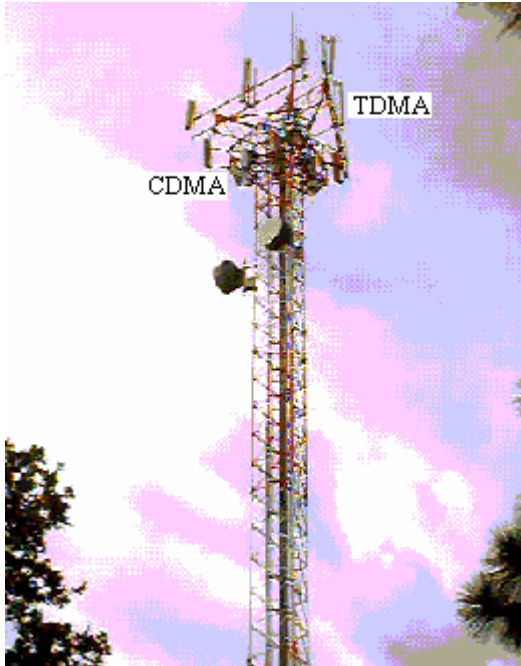
Como se realizaron mediciones en una franja de la ciudad de Bucaramanga bastante amplia para el cubrimiento de una sola celda (Dada por la BS de Provenza), se procedió a incorporar una segunda celda y obviamente su estación base respectiva en el barrio real de minas que es la más próxima al barrio la Victoria (ver figura 6.1.a). Con esta inclusión podemos apreciar la diferencia existente entre los datos medidos y simulados en este barrio, puesto que la simulación solo considera la BS de Provenza.

Si ambas estaciones usaran la misma frecuencia (en la realidad usan frecuencias de portadora diferente), se sumarían las potencias obtenidas por cada estación base respecto a las simulaciones en 4 de las 6 rutas en estudio (las rutas 1 y 2 son muy cercanas a la estación base de Provenza, descartándose así una posible influencia de la otra BS) para luego confrontarlas con las medidas de campo que toman un valor automático de la suma de potencias de ambas estaciones. En la figura 6.11 se puede apreciar que las estaciones base poseen las tres antenas CDMA que dan la sectorización. Cabe destacar que las estaciones base en estudio poseen la tecnología TDMA (estándar IS-36) ubicada en la parte superior de la antena, y CDMA en la parte inferior (figura 6.8.a) presentando diferente sectorización: Las antenas TDMA muestran sectorización direccional cada una separada de la otra en  $120^\circ$  (Ver trabajo realizado en [28]).

Igualmente las tres antenas CDMA exhiben sectorización direccional a  $120^\circ$ . Como se puede apreciar en la figura 6.11, hay una diferencia de  $60^\circ$  entre cada panel TDMA y CDMA. Se realizaron simulaciones por sector para emular la realidad. En cuanto al área de cobertura para el proyecto, la BS de

Provenza utilizó los sectores a  $100^\circ$  NE y  $340^\circ$  NE. La BS de Real de Minas usó solamente el sector a  $190^\circ$  NE.

**Figura 6.8. Estaciones base en estudio**



**a) Estación base Provenza (BS1)**

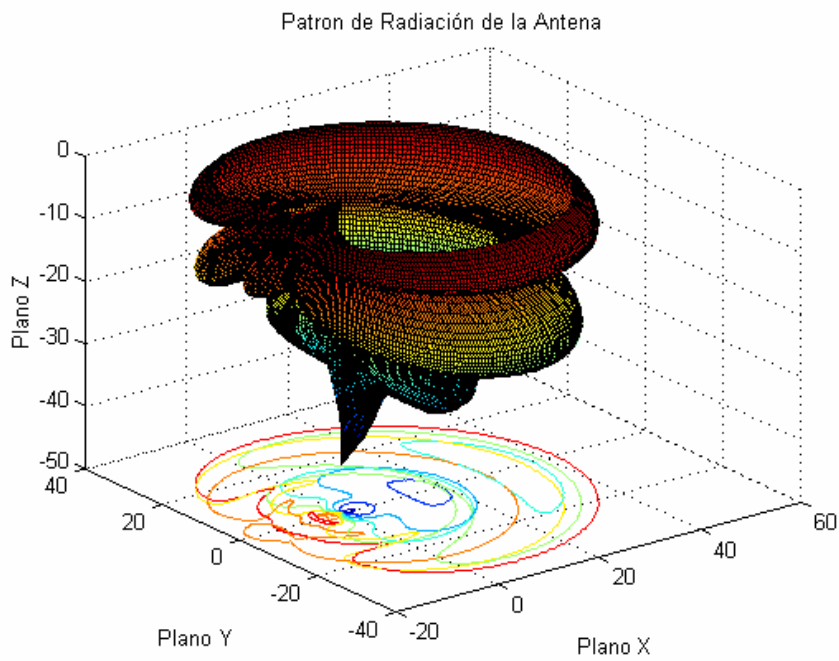


**b) Estación base Real de Minas (BS2)**

Los parámetros principales que definen a las estaciones base que cubren el servicio de telefonía móvil celular (estándar CDMA 2000) en la zona piloto de estudio vienen dados por el patrón de radiación de las antenas utilizadas en dichas BS, el cual correspondió a un tipo de antena referenciada como DB874G90R fabricada por la compañía Decibel Products. Para mayor información visitar la dirección Web [www.decibelproducts.com](http://www.decibelproducts.com).

El patrón de radiación se aprecia en las Figura 6.9 y 6.10; éstas figuras fueron obtenidas gracias a los planos H-V encontrados en las tablas del patrón de dicha antena (ver el Anexo C). El patrón de radiación de la figura 6.9 corresponde a la mitad inferior de éste, ya que las estaciones base son más altas que cualquier estructura en toda la zona de estudio (radiación hacia abajo), dejando sin utilidad la parte superior de dicho patrón. La obtención de este patrón fue un trabajo realizado en cooperación con [55].

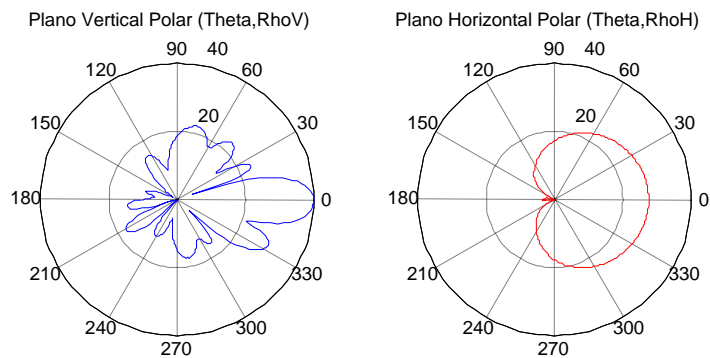
**Figura 6.9: Patrón de radiación 3D de la antena DB874G90R  
Mitad volumétrica inferior**



**Figura 6.10: Patrón de radiación H-V de la antena DB874G90R. a) Plano vertical. b) Plano horizontal**

a)

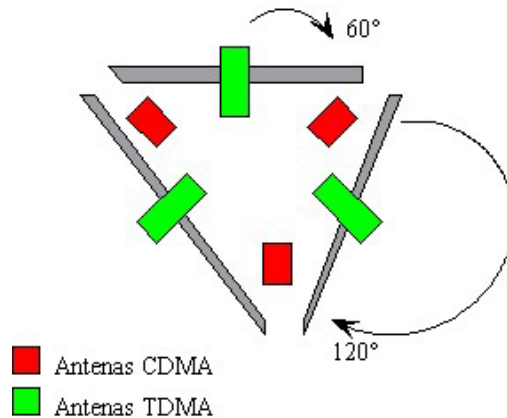
b)



**Tabla 6.1: Parámetros para ambas estaciones base y valores de entrada establecidos para todas las simulaciones.**

PARÁMETROS	VALOR
PIRE de la BS	40 dBm
Ganancia antena DB874G90R	12.5dBd
Ganancia del receptor	0dB
Portadora	881.525MHz
Altura del Transmisor	38m
Altura del Receptor	1.8(Celular) y 2.5m(TCI)
Downtilt de la antena	0°
Acimut de la antena Provenza Acimut de la antena Real Minas	100°, 220°, 340° NE 70°, 190°, 310° NE
Factor de curvatura K	1.33
Tamaño de celdas del grid para simulación	3m

**Figura 6.11 Sectorización antenas de las estaciones base en estudio.**

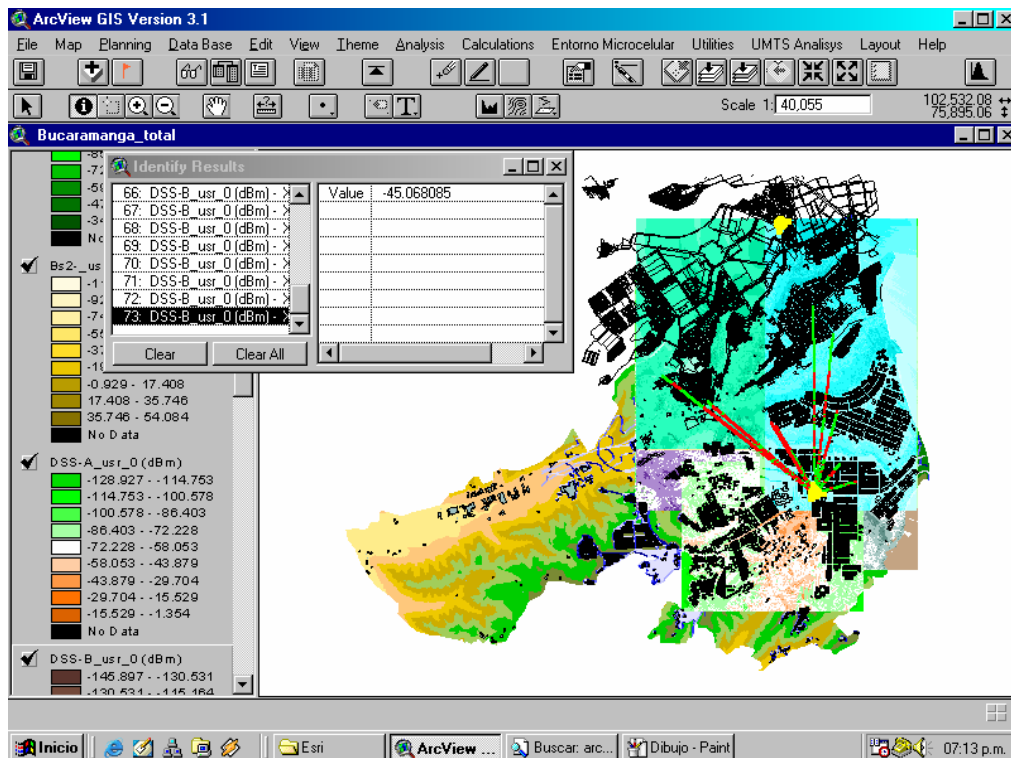


**Fuente: Autores del proyecto**

## 6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En primera instancia, se examinarán los resultados de las medidas promedio de campo tomadas por el sistema integrado TCI del ministerio de comunicaciones confrontadas con las simulaciones (Modelo Walfish–Ikegami modificado UIS [28] utilizando antenas omnidireccionales y sectorizadas) para cada uno de los puntos en las seis rutas de análisis. De igual forma se realizará el análisis para las medidas de campo tomadas con los celulares Kyocera 3G CDMA comparando con las simulaciones respectivas. Como parte final se confrontan los resultados obtenidos por los equipos receptores y se realizará un análisis de shadowing para la ruta 3 en el Barrio San Luis. En la figura 6.12 se muestra el proceso de simulación para poder visualizar el nivel de potencia que arroja el modelo.

Figura 6.12 Proceso de simulación en CellView



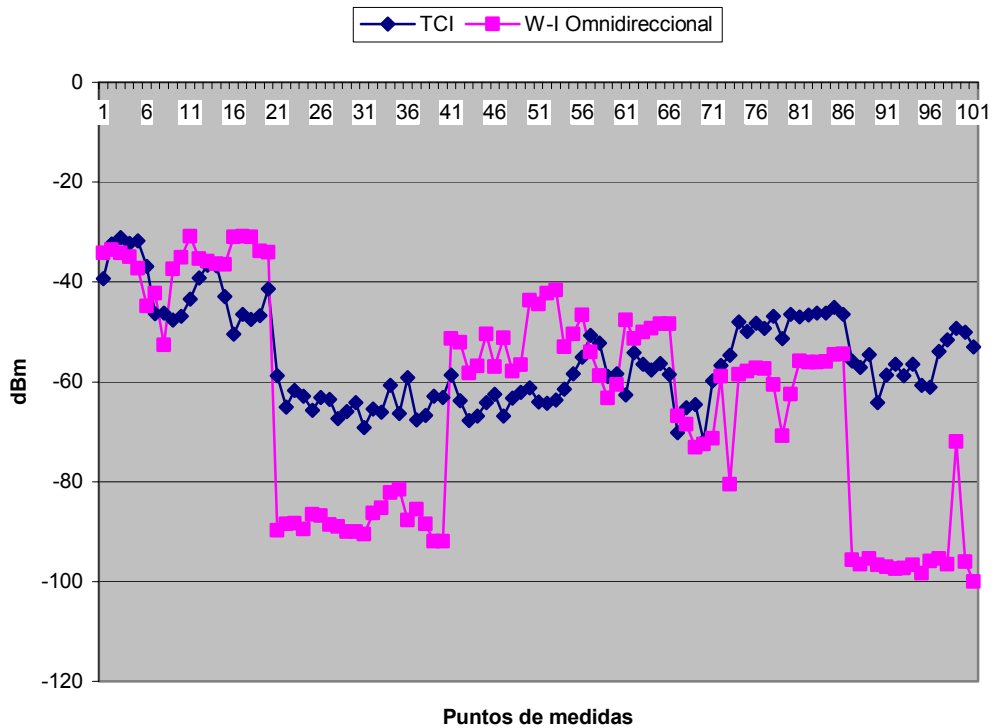
Fuente: Herramienta de planificación CellView

#### **6.4.1 Sistema TCI Vs Walfish–Ikegami modificado UIS Omnidireccional**

Para comenzar, se procedió a obtener la diferencia entre las mediciones realizadas con el equipo TCI y las simuladas con el modelo Walfish–Ikegami modificado UIS en [28] para cada ruta respectiva. Para tener puntos de comparación se tomaron las desviaciones estándar de las diferencias entre los valores medidos promedio y las simulaciones para cada uno de los puntos en las seis rutas de análisis (Ver Tabla B.7 en el Anexo B). Para las rutas 2, 3 y 6 (barrios Provenza, San Luis y la Victoria) el modelo se comportó de forma más aproximada a las mediciones (STD de 4.07 a 6.21dBm) y no tanto para las rutas 5, 4 y 1 de los barrios Bucaramanga, San Luis y Provenza (STD de 6.3 dBm a 8.1 dBm). Una de las principales características de los resultados del modelo COST231 Walfisch-Ikegami (W-I) modificado es la gran aproximación alcanzada a las mediciones de campo realizadas en la ruta 3 caracterizada por su gran inclinación. Esto nos confirma que el modelo W-I es el apropiado para simular regiones con terreno escarpado. La desviación estándar fue de 6.21809 y es muy aproximada a las obtenidas en [28].

Dado que las mediciones se llevaron a cabo siguiendo la consideración colina-valle-colina, el comportamiento del modelo es muy aceptable. Además, para comparar lo realizado en [28], en este proyecto se incluyen antenas omnidireccionales que simulan el mismo comportamiento en [28] y sirve de comparación con el uso de la sectorización en el presente proyecto y que se usa para obtener un mejor desempeño del sistema. En la figura 6.13 se puede apreciar la comparación gráfica entre las medidas de campo efectuadas con el sistema TCI y el modelo.

**Figura 6.13. Medidas de campo del equipo TCI comparado con el modelo Walfish-Ikegami Modificado UIS en [28] para antenas Omnidireccionales.**



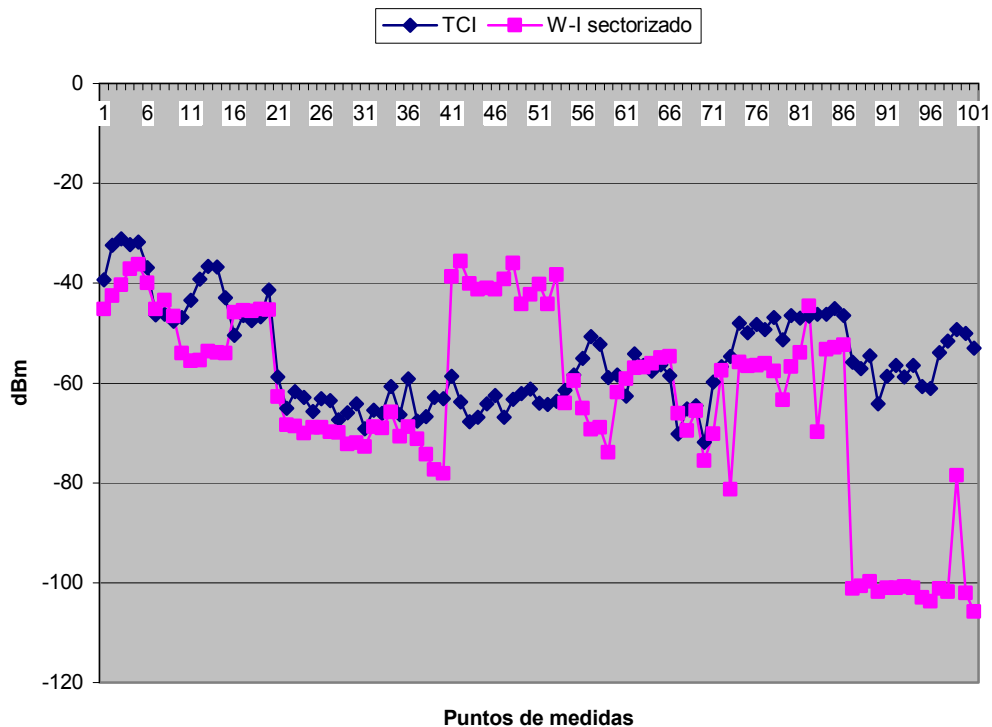
Como se puede apreciar en la figura 6.13, en los últimos 45 puntos de medición, que corresponden a las campañas de medidas en el barrio la victoria, se observa una diferencia respecto al modelo; esto se debe a la posición equidistante de esta ruta respecto a las dos estaciones base. Se recomienda hacer ajustes al modelo para tener en cuenta el caso de handover en CDMA.

De acuerdo a la gráfica anterior y a sus resultados estadísticos (ver tabla B.7 anexo B) se puede decir que el equipo TCI no solamente es útil para efectos de regulación de radiaciones electromagnéticas si no también para realizar medidas de campo confiables con fines de planificación celular.

### 6.4.2 Sistema TCI Vs Walfish-Ikegami modificado UIS Sectorizado.

Para obtener un mejor desempeño del modelo se confrontaron las mediciones tomadas con el equipo TCI del ministerio con el modelo para antenas dirigidas (Ver figura 6.14) y los resultados para cada ruta respecto a la STD fueron más aceptables que los anteriores, consiguiéndose STD desde 3.5 a 7.7 dBm. Específicamente para la ruta 3 (terreno montañoso) el modelo se comportó apropiadamente (STD 3.61) ya que la pendiente está considerada en este algoritmo. Solo la ruta 4 (terreno plano) presentó una inconsistencia debido a su alto grado de Shadowing, En la Tabla B.7 en el Anexo B se pueden ver los resultados de las simulaciones para este modelo.

**Figura 6.14. Medidas de campo del equipo TCI comparado con el modelo Walfish-Ikegami Modificado UIS para antenas sectorizadas.**



### 6.4.3 Walfish-Ikegami modificado Omnidireccional Vs Sectorizado

Como última parte respecto a las medidas de campo realizadas con el equipo TCI, se hace una comparación estadística para observar las diferencias entre los modelos utilizados en las simulaciones. En el anexo B se muestran las tablas con valores estadísticos para cada ruta en estudio. En la tabla 6.2 se aprecia los datos estadísticos promedio de la diferencia entre el equipo TCI y los modelos utilizados.

**Tabla 6.2: Paralelo estadístico promedio para el modelo Walfish-Ikegami modificado Omnidireccional y Sectorizado. Mediciones equipo TCI.**

PARÁMETRO	Omnidirecc. [dBm]	Sectorizado [dBm]
STD	6,2321	5,8206
DIFERENCIA MINIMA	7,7368	8,68182
DIFERENCIA MAXIMA	18,8387	18,6823
MEDIANA	8,1123	6,7168
PROMEDIO	8,3127	7,4028
ERROR TIPICO	5,3037	5,1416
INTERVALO DE CONFIANZA	2,1871	2,02625

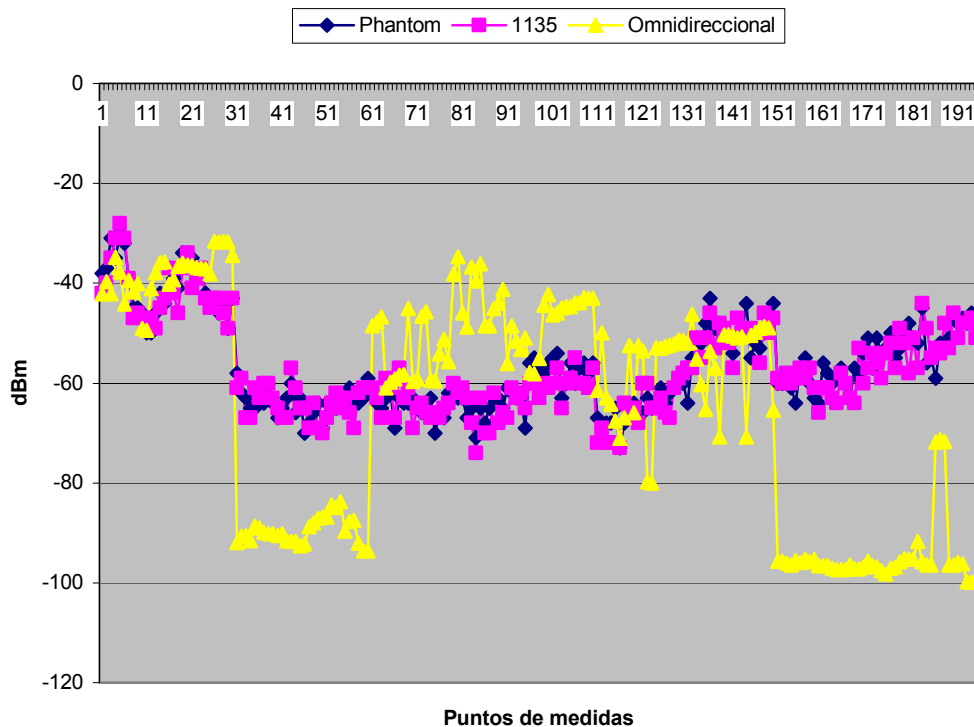
\* El intervalo de confianza usó un nivel de confianza del 95% en todas las rutas.

Teniendo en cuenta los valores obtenidos en la tabla 6.2 se puede apreciar la mejora en cuanto al desempeño del modelo al ser sectorizado. Con una magnífica desviación estándar de 5.8206 las simulaciones por sector realizadas para el equipo TCI dan un gran respaldo a las modificaciones realizadas en [28] al algoritmo; y al ser comparadas con otros estudios como el de Munich (STD de 7.0 dBm) se puede notar el perfeccionamiento que se ha logrado. La importancia de esta hazaña radica en la utilización de condiciones topográficas variables: rutas tanto planas (rutas 1 y 6), como inclinadas (rutas 2 y 3) y planas dentro de un terreno escarpado (rutas 4 y 5).

#### 6.4.4 Celulares CDMA Vs Walfish-Ikegami modificado Omnidireccional

Así mismo, el análisis para las medidas de campo tomadas con el celular Kyocera 1135 3G CDMA comparando con las simulaciones respectivas obtuvo un resultado sorprendente puesto que la desviación estándar de 7.6 dBm obtenida es muy aproximada a la alcanzada en [28] (Ver anexo B), lo cual es bueno para efectos de comportamiento del modelo. Esta conducta se puede verificar en la figura 6.15 que demuestra que al medir con el celular CDMA los valores son muy aproximados al modelo ya que se está utilizando un solo canal (similar a TDMA para propósitos de planificación). Como se explicó en la sección 6.3 esto contrasta con el equipo TCI que mide todo el canal físico de 1.25 MHz, compartido por todos los usuarios activos más canales de control y tráfico presentes en la portadora CDMA.

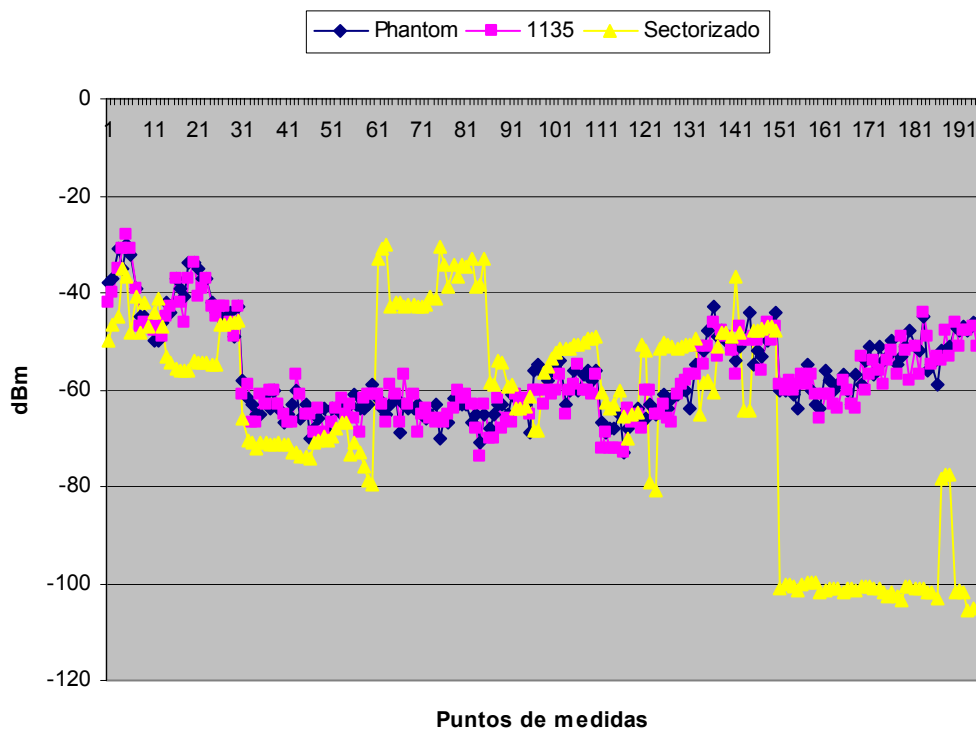
**Figura 6.15. Medidas de campo Celulares 3G CDMA comparado con el modelo Walfish-Ikegami Modificado en [28] para antenas Omnidireccionales.**



#### 6.4.5 Celulares CDMA Vs Walfish-Ikegami modificado UIS Sectorizado.

Asumieron mejor comportamiento casi todas las rutas (STD de 4.1 a 8.6 dBm). Lo contrario ocurrió con las ruta 5 que reportaron valores de 9.8 dBm, tanto para el celular kyocera 1135 como para el Phantom.

**Figura 6.16. Medidas de campo de los celulares CDMA comparado con el modelo Walfish-Ikegami Modificado UIS para antenas sectorizadas.**



En este apartado se ven los verdaderos alcances del proyecto en cuanto a la consolidación del algoritmo de predicción ya que se obtuvo una desviación estándar de 7.0149 con el celular Kyocera Phantom y de 7.0235 con el 1135 para corroborar los resultados. En comparación con estudios al respecto como el realizado en Munich (STD de 7.0), es sorprendente afirmar que se ha conseguido llegar a valores muy aproximados a estudios de talla internacional y ubican este proyecto como de gran ayuda para la elaboración de un modelo que considere condiciones topográficas no uniformes.

### 6.4.6 Walfish-Ikegami modificado Omnidireccional Vs Sectorizado

A diferencia del equipo TCI, las simulaciones respecto al celular sirven como punto de partida para un proceso de planificación correcto, ya que como se ha explicado anteriormente, el celular representa un canal, lo cual se asemeja al comportamiento del modelo que esta diseñado para sistemas TDMA en cuanto a medir niveles de potencia de la señal transmitida por una o dos estaciones base. En la tabla 6.4 se aprecia la diferencia estadística entre el modelo utilizado respecto a las medidas de campo realizadas con los celulares.

**Tabla 6.3: Paralelo estadístico promedio para el modelo Walfish-Ikegami modificado Omnidireccional y Sectorizado. Mediciones celulares CDMA.**

PARAMETRO	Cel. 1135 (dBm)		Cel. Phantom(dBm)	
	Omnid.	Sectoriz.	Omnid.	Sectoriz.
STD	7,6187	7,0235	7,7235	7,0149
DIFERENCIA MINIMA	6,22519	6,69041	5,76116	7,93789
DIFERENCIA MAXIMA	20,6008	18,4122	21,4161	19,3653
MEDIANA	5,16955	3,45756	5,80277	4,33873
PROMEDIO	5,32065	4,07070	6,01204	4,76209
ERROR TIPICO	6,00263	5,71917	6,07753	5,73736
INTERVALO DE CONFIANZA	2,64545	2,41823	2,67372	2,41226

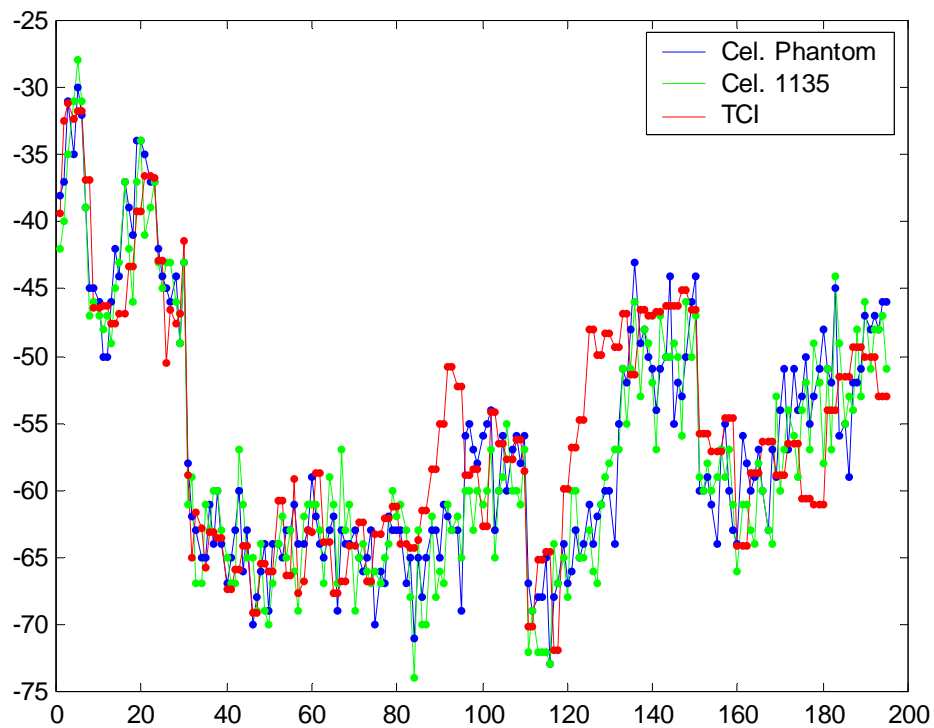
\* El intervalo de confianza usó un nivel de confianza del 95% en todas las rutas.

Teniendo en cuenta la tabla 6.4 se puede determinar que el modelo Walfish-Ikegami sectorizado tiene un notable mejor desempeño respecto al omnidireccional puesto que en el análisis que se ha realizado se han conseguido mejoras en todos los parámetros estadísticos. Para mayor información dirigirse al anexo B en las tablas B.7 y B.8.

### 6.4.7 Sistema TCI Vs Celulares CDMA

Por último es importante hacer una comparación entre las mediciones de campo tomadas por el equipo TCI del ministerio de comunicaciones y los celulares Kyocera 1135 y Phantom CDMA. Como se puede apreciar en la figura 6.17 los datos tomados a través de cada ruta son aproximadamente cercanos, pero haciendo un análisis estadístico se puede apreciar más de cerca sus diferencias (Ver tabla 6.4).

**Figura 6.17 Medidas de campo equipo TCI comparado con mediciones realizadas con el móvil 3G CDMA**



Cabe anotar que para el equipo TCI se tomaron mediciones cada seis metros, mientras que para los celulares cada tres. En la gráfica se ubican puntos de medidas iguales al anterior en el TCI para rellenar los espacios en blanco.

**Tabla 6.4. Comparación estadística entre el sistema TCI con el celular Kyocera 1135 3G CDMA y con el Kyocera Phantom respectivamente.**

RUTA	Coefficiente de correlación	Error típico	Diferencia mínima	Diferencia máxima	Mediana	Promedio	STD	varianza	Intervalo de confianza
1	0,8348712	3,150734	0,119355	7,568108	0,163769	0,1259551	3,44248	11,8507	1,231854
2	0,2140763	3,138338	0,099211	6,828744	-1,357451	-0,379635	3,71279	13,7848	1,328580
3	-0,0607097	3,400824	0,664000	3,742142	-0,664000	-0,616395	4,18797	17,5391	1,498617
4	0,191622	4,002343	1,109742	10,97975	3,561555	4,0777342	4,64864	21,6099	1,663464
5	0,7783984	5,184757	0,355482	17,08473	5,816147	6,0304686	5,58679	31,2122	1,999170
6	0,5363641	5,192140	1,815323	4,723275	-2,502653	-1,123165	5,10615	26,0727	1,827178
<b>Promedio</b>	<b>0,415770</b>	<b>4,01152</b>	<b>0,69385</b>	<b>8,48779</b>	<b>0,83622</b>	<b>1,352493</b>	<b>4,44747</b>	<b>20,3449</b>	<b>1,59147</b>

RUTA	Coefficiente de correlación	Error típico	Diferencia mínima	Diferencia máxima	Mediana	Promedio	STD	varianza	Intervalo de confianza
1	0,8883792	2,726783	0,085158	4,568108	-1,105250	-0,674044	2,86527	8,20979	1,025305
2	0,6652945	2,364500	0,079117	3,268067	-0,526354	-0,629635	2,41414	5,82811	0,863875
3	-0,0722489	2,275003	0,174826	6,765587	1,212586	0,7682194	3,38691	11,4711	1,211968
4	-0,1013189	4,436659	0,171065	11,26054	2,360657	2,6931188	5,70777	32,5787	2,042463
5	0,7638875	5,031609	0,446190	14,67665	4,141427	5,2304686	5,66999	32,1488	2,028942
6	0,6070081	4,128967	0,184676	4,411767	0,444245	-0,389832	4,14453	17,1771	1,483073
<b>Promedio</b>	<b>0,458500</b>	<b>3,49392</b>	<b>0,19017</b>	<b>7,49178</b>	<b>1,08788</b>	<b>1,166382</b>	<b>4,03143</b>	<b>17,9022</b>	<b>1,44260</b>

Como se puede apreciar en la tabla anterior los datos tomados por los equipos respecto a cada ruta no difieren en forma significativa; solamente se observa que para las rutas 5 y 6 hubo una diferencia considerable teniendo en cuenta sus desviaciones estándar. Este fenómeno se puede explicar ya que en la ruta 5 la pendiente arroja valores diferentes pues la altura de los receptores se hace más evidente que en terreno plano; en cambio para la ruta 6 se puede apreciar la diferencia por estar ubicada en zona de handover o traslape de celdas. En esta zona depende la altura del receptor, ya que se están tomando la señal de dos estaciones bases diferentes.

Respecto a los modelos utilizados en las simulaciones, el celular Kyocera 3G CDMA obtuvo desventaja respecto al equipo TCI, presentándose desviaciones estándar promedio de 7.0149 (kyocera Phantom) y 5.8206 dBm respectivamente. Por lo tanto para efectos del proceso de simulación es

aceptable medir con ambos equipos, ya sea con fines de regularización del nivel de señal o para efectos de desarrollo de modelos de planificación celular. Por último, se puede decir que las mediciones tomadas con cada equipo respecto a su modelo son de gran aprobación y sirven como base comparativa para otros estudios que se deseen hacer al respecto.

Por otro lado y para corroborar la teoría expuesta en el capítulo anterior, en todas las rutas tanto las mediciones como el modelo presentaron disminución en la potencia recibida debido a obstáculos (Shadowing), inclinaciones del terreno y acercamiento a la zona de handover (traslape entre celdas). No se tomó en cuenta el problema de rayos multicamino puesto que tanto el equipo TCI como el celular realizan múltiples mediciones a distancias mayores que la longitud de onda de la señal, promediando los resultados y por ende solucionando el inconveniente.

Como se explicó en los capítulos 3 y 5, las rutas con terreno plano cerca de la estación base tienen nivel de señal más alto que las más lejanas. Así como los efectos de ensombrecimiento (shadowing) en las rutas 1,2 y 3 debido a autos, casas y árboles entre la estación base y el equipo receptor (la ruta 1 tiene alto nivel de tráfico vehicular y también presencia de árboles de gran altura en el separador de la calle donde se tomaron las medidas).

A continuación se hará un análisis de shadowing para la ruta 3 que presenta puntos equidistantes a la estación base. Para la ruta 6 (sector de handover) suponiendo ambas estaciones base con la misma frecuencia, se debería mostrar que en ciertos puntos de medidas una estación base tiene mejor nivel de señal que la otra. Al final, el equipo receptor suma ambas potencias para tener una mejor calidad en el servicio.

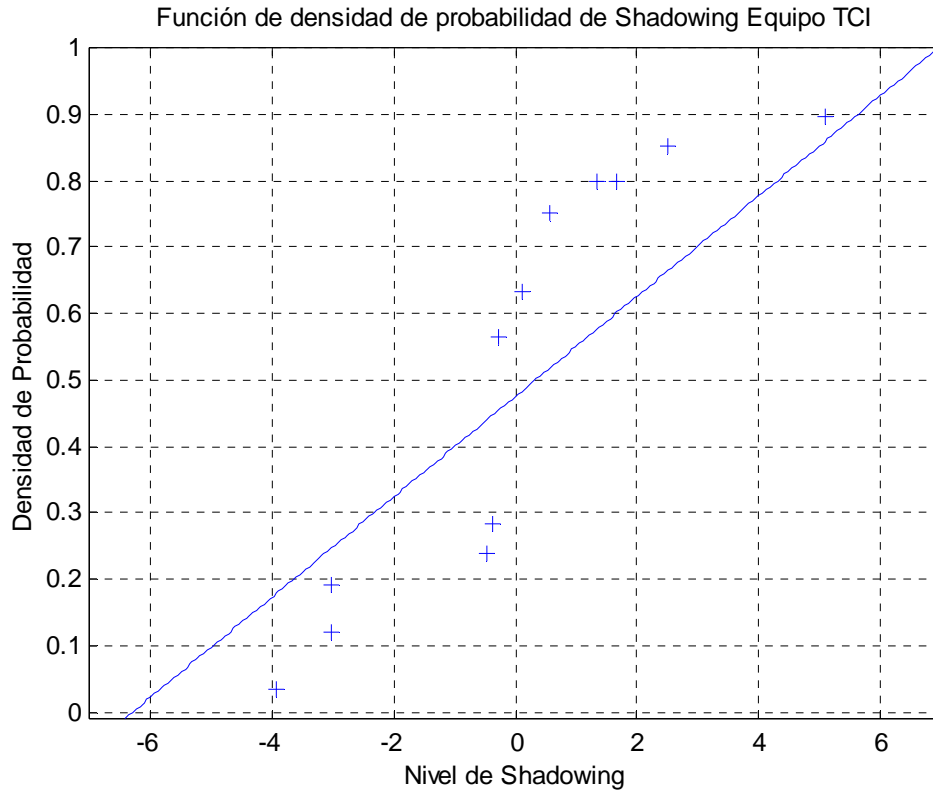
## 6.5. ANALISIS DE SHADOWING

Desde el punto de vista teórico explicado en el capítulo 5, el nivel de shadowing determina un comportamiento log-normal de los datos de potencia tomados en la equidistancia de una estación base en condiciones de línea de vista perfecta (el nivel de señal en todos los puntos deben ser iguales).

Pero al entrar en la realidad observamos que muchos obstáculos se interponen en el trayecto de la BS al móvil y lo que se buscará comprobar en este apartado es que al tomar mediciones equidistantes a la BS en banda ancha con tecnología CDMA (ya se realizó un análisis similar en [28] con TDMA) se debe aproximar a la variable log-normal citada anteriormente. De igual forma este comportamiento es de gran importancia a la hora de planificar en el CellView, ya que esta herramienta detecta este tipo de comportamiento de las ondas electromagnéticas al utilizar el modelo COST231-Walfish Ikegami modificado para entornos andinos, realizado por el grupo RadioGIS de la UIS en el año 2002 [28].

Para la realización de este estudio se determinaron puntos de medida equidistantes a la estación base ubicados en el barrio San Luis, más específicamente en la ruta No 3 (Ver Anexo A), a partir de los cuales se pudo obtener los niveles de shadowing tomando la potencia recibida en cada punto menos la mediana de las mediciones de la ruta (estos valores se muestran en la tabla A.7), y así evaluar la función de densidad de probabilidad log-normal para el sistema TCI y el celular, como se puede apreciar en las figuras 6.18 y 6.19 respectivamente.

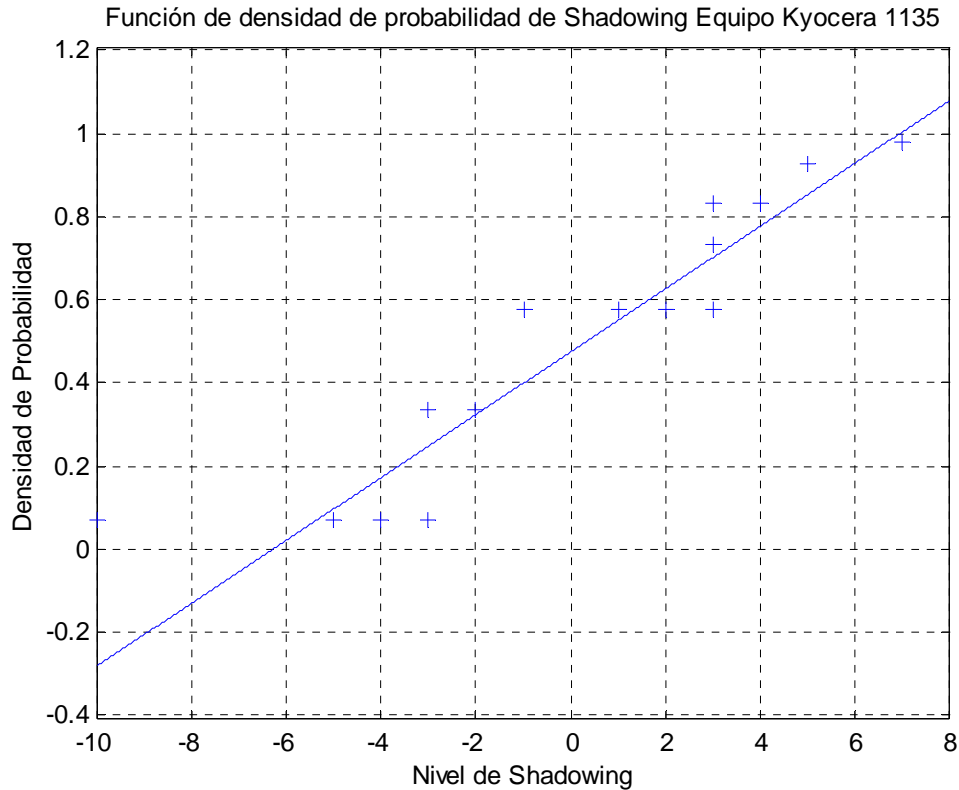
**Figura 6.18. Característica de Shadowing del sector. Funciones de densidad de probabilidad para las mediciones realizada en la ruta 3 con el equipo TCI.**



**Fuente: MATLAB**

Teniendo en cuenta la gráfica anterior se puede confirmar que la distribución estadística de shadowing en la ruta No. 3 del barrio San Luis sigue una función de densidad de probabilidad Log-normal. Con esto confirma que para banda ancha y particularmente para CDMA se puede hacer análisis de shadowing. Para mayor información consultar el trabajo realizado con la tecnología TDMA en [28]. En la tabla A.7 se muestran los valores puntuales de la función de densidad de probabilidad que describe los efectos de shadowing para la ruta mencionada.

**Figura 6.19. Característica de Shadowing del sector. Funciones de densidad de probabilidad para las mediciones con el celular Kyocera 1135.**



**Fuente: MATLAB**

En la figura se aprecia la distribución log-normal aproximada para los puntos de medidas tomados con el celular CDMA constatando que para un canal CDMA se cumple el análisis de shadowing. En la tabla A.7 se muestran los valores que describen los efectos de shadowing para la ruta mencionada.

Es importante resaltar que las demás rutas realizadas para la adquisición de datos en campo, no cuenta con una distribución equidistante con respecto a la estación base, por lo tanto, no se pueden considerar en el análisis de shadowing.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1 CONCLUSIONES**

Este proyecto es la continuación del trabajo realizado en [28] efectuado por la UIS en el marco de un proyecto conjunto con las Universidades ICESI, UPV y la empresa TESAMERICA con la visión de llegar a liderar en Colombia el desarrollo de herramientas de planificación celular basadas en GIS y modelamiento de la radio propagación sobre terreno escarpado probado en el escenario proporcionado por la región andina.

Cabe destacar que la presente investigación propone las bases para el modelamiento de la radio propagación en las comunicaciones móviles de banda ancha con tecnología CDMA (Acceso Múltiple por División de Código) para ambientes que posean terreno escarpado. Por esto se puede decir que el presente estudio se convierte en parte fundamental para la realización de posteriores investigaciones en el campo de las comunicaciones móviles de banda ancha dirigidas a la radio propagación electromagnética en presencia de terreno irregular.

Además se da el primer paso en explicar de forma teórica esta nueva tecnología que esta siendo utilizada actualmente por la empresa Bellsouth y su incidencia en la radio propagación para analizar los fenómenos que ocurren cuando la señal viaja entre el transmisor y el receptor de este sistema móvil de banda ancha.

Se dividen las conclusiones en seis bloques que corresponden a los capítulos realizados en la investigación:

### **7.1.1 Estado del Arte de las Comunicaciones Móviles en Colombia.**

- La tecnología de las comunicaciones móviles en Colombia ha evolucionado desde su introducción en 1991 con la segunda generación en TDMA, hasta llegar a la 2.5 Generación en la actualidad con los sistemas GSM (con las empresas de Telefonía Móvil COMCEL Y OLA TELECOMUNICACIONES) y CDMA2000 (BELLSOUTH).
- La evolución de la telefonía móvil Celular en Colombia, ha sido impulsada por la introducción en el mercado de una nueva compañía en el sector, que ha estimulado la inversión en el desarrollo tecnológico de las Compañías existentes.

### **7.1.2 Sistema CDMA**

- Se avanzó en el conocimiento de la tecnología de comunicación móvil de banda ancha CDMA, sirviendo así de apoyo para todo estudiante que desee introducirse o aprender más acerca de esta tecnología que se proyecta como una de las dos más utilizadas a nivel mundial.
- El uso de la sectorización de tres antenas aumentan la capacidad de las estaciones base en término de intracelda. Cuándo existen dos estaciones base que usan la misma frecuencia proporcionando señal a un móvil, se suman sus niveles de potencia en el rake receiver del receptor para dar mejor calidad en el servicio.

### **7.1.3 Radiopropagación**

- El incremento del path loss en terreno plano, con respecto al establecido para el espacio libre, se determina por la relación logarítmica entre las distancias existentes entre la radio base y el móvil, y la distancia en la cual el

receptor puede recibir un máximo de potencia en condiciones de espacio libre.

- En el cálculo de las pérdidas por un filo de cuchillo juega un papel muy importante el path loss ocasionado por la difracción ocurrida en los techos de los edificios y montañas modelados por fillos de cuchillo, que se ve afectado en gran medida por la distancia entre el transmisor y receptor. Sin embargo en presencia de múltiples obstáculos modelados por fillos de cuchillo, la característica de path loss se determina principalmente por el número de obstáculos entre la radio base y el móvil y las difracciones ocurridas en los mismos.

#### **7.1.4 Radio propagación en ambiente inalámbrico móvil con tecnología CDMA en entorno andino.**

- La radio propagación electromagnética en banda ancha se ve afectada principalmente por los efectos a pequeña escala, especialmente el fast fading que corresponde a las pequeñas diferencias de fase entre los rayos producidos por la propagación multicamino las cuales varían rápidamente a través del canal de banda ancha ocasionando la distorsión de la señal. Sin embargo en la tecnología CDMA se mitigan estos efectos haciendo uso de el rake receiver, en el cual se multiplican varias copias de la señal recibida por versiones del código de ensanchamiento desplazadas en el tiempo y luego se recombinan para obtener los componentes de la señal original eliminando así los retardos ocasionados por la propagación multicamino.

- Las diferencias de fase ocasionadas por la propagación de los rayos multicaminos y sus demoras de propagación respectivas, están sujetas a las características del terreno en el cual se encuentra el área de cobertura de la celda, tales como: presencia de árboles, edificios, personas, y otros

obstáculos que causen reflexión, dispersión y difracción significativas en los rayos multicamino.

- El movimiento relativo entre el receptor y el transmisor, así como la velocidad de los objetos cercanos al móvil, contribuyen en gran medida al retardo de los rayos multicaminos en el canal de banda ancha, alcanzando a dominar los efectos a pequeña escala cuando la velocidad de dichos objetos es mayor a la del receptor.
- Si las demoras ocasionadas por la propagación multicamino son mayores que la duración de la unidad básica de información transmitida en CDMA, se producirá distorsión en la señal recibida, traducida en la pérdida de bits de información, tal como ocurre en entornos andinos, en donde algunos rayos se reflejan en colinas alejadas y luego se reciben en el móvil.
- Los efectos de la propagación multicamino, son enfrentados en CDMA aplicando técnicas avanzadas de recepción tal como los rake receivers, la macrodiversidad y las técnicas MIMO (canales de múltiples entradas y múltiples salidas, en los cuales se hace uso de arreglos de antenas y de procesamiento espacio temporal de la señal. Área en el cual el grupo radioGIS – UIS está incursionando gracias a un trabajo de investigación conjunto con el MCG de la Universidad Politecnica de Valencia- España, y con el patrocinio de la comunicad Europea dentro del programa Alban de Becas de alto nivel [41].)

### **7.1.5 Campañas de medidas y simulaciones**

- Las campañas de medidas con el sistema integrado TCI del ministerio de comunicaciones Dirección Territorial Bucaramanga fue una solución a la recomendación en [28] referente a toma de medidas de campo de forma eficiente. El empleo de esta unidad móvil ahorro tiempo y sistematizó esta

labor para lograr precisión y exactitud al medir la potencia de la señal emitida por las estaciones base en estudio.

- Las campañas de medidas con el celular Kyocera 3G CDMA fueron de gran importancia en cuanto a los aportes que brinda a este trabajo, ya que a diferencia del equipo TCI del ministerio de comunicaciones que mide la potencia recibida en todo el espectro CDMA, este receptor mide la potencia tomada por un solo canal CDMA, es decir, por un usuario, lo que permite un acercamiento a las simulaciones realizadas.

- Los resultados de la simulación fueron similares a los arrojados por las campañas de medidas, esto lo corroboran los datos estadísticos presentados en el anexo B. Se puede decir que los modelos utilizados se comportaron de forma aceptable y teniendo en cuenta trabajos realizados anteriormente, como en [28], donde se obtiene una desviación estándar de 7.6 dBm, se mejoró con la STD de 7.01 dBm obtenida en esta investigación con el modelo Walfish- Ikegami modificado (también utilizado en [28]) respecto a las medidas tomadas con el celular. Además se acerca a la STD de 7.0 obtenida en estudios similares realizados en Munich.

- Como parte de la investigación referente al estudio de radiopropagación en CDMA, se efectuó un análisis de Shadowing en una ruta ubicada en el barrio San Luis, consiguiéndose luego de un examen estadístico, comprobar por su comportamiento de función lognormal que todos los puntos tomados en dicha ruta son equidistantes a la estación base ubicada en el barrio provenza, y por consiguiente decir que la señal recibida tiene un comportamiento estadístico similar y es una variable aleatoria útil en el estudio.

- Los resultados de este proyecto son fundamentales para el análisis de densidad de potencia según la norma K52 de la UIT en sistemas de tercera

generación y son la base para el desarrollo de proyectos de maestría dentro del grupo RadioGIS en la UIS.

- Las campañas de medidas realizadas con el equipo TCI del ministerio de comunicaciones dirección territorial Bucaramanga son de gran importancia para la regulación en Colombia por parte del Ministerio de Comunicaciones en el Proyecto de Decreto límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos, se define metodología para la medición y se adecuan procedimientos para la instalación de estaciones radioeléctricas.

- Se han dado resultados útiles que permitirán hacer nuevos ajustes al algoritmo Andino UIS [28] basado en el modelo COST 231 Walfish-Ikegami desarrollado por el grupo RadioGIS.

- Finalmente, todos los objetivos planteados en el plan presentado para el desarrollo de ésta investigación se cumplieron satisfactoriamente.

## **7.2 RECOMENDACIONES.**

- Realizar trabajos similares con otros sistemas de banda ancha tales como GSM y GPRS para así poder ampliar más los conocimientos sobre la radiopropagación en este tipo de sistemas e incrementar las fronteras que tiene el grupo RadioGIS respecto al modelamiento haciendo uso de herramientas de planificación basadas en GIS, tal como el CellView y la herramienta ICS-Telecom con la cual cuenta la compañía TESAmerica Andina.

- Establecer alianzas estratégicas con los operadores de telefonía móvil celular en Colombia con el fin de desarrollar proyectos de este tipo que beneficien a ambas partes y se conviertan en progreso y ejemplo para la comunidad mundial.

- En el presente proyecto no se realizó análisis de densidad de potencia con las medidas de campo tomadas con el sistema TCI para comparar normas de irradiación internacionales, pero se podrían usar posteriormente para dichos fines.

- Uno de los aspectos importantes en estas consideraciones es que el procedimiento de medición debe ser automatizado en posteriores investigaciones, ya que exige tomar muchas mediciones para ser luego promediadas. Una alternativa para realizar mediciones manualmente es obtener menos puntos, pero manteniendo las muestras necesarias para garantizar resultados estadísticos confiables. En esta investigación se utilizó el sistema integrado TCI del ministerio de comunicaciones Dirección Territorial Bucaramanga.

- Para hacer mejoras al proceso de planificación celular en sistemas CDMA es necesario realizar más aproximaciones a los algoritmos implementados en este proyecto. Para ello se debe tener en cuenta el trabajo realizado en [28]; de esta forma se logrará más precisión en valores estadísticos como la desviación estándar, fundamental a la hora de calificar la tarea desarrollada y el desempeño de un modelo de propagación.

- La planificación de un sistema de telefonía móvil de CDMA exige tener en cuenta diferentes factores que afectan la cobertura del dicho sistema. Además de los conceptos de radio propagación para banda ancha, es necesario tener en cuenta la interferencia interceldas e intraceldas por lo tanto se recomienda para estudios posteriores la realización de un análisis de capacidad con este propósito.

- Para medidas de canales CDMA se propone la compra del equipo “The Hummingbird”, o uno similar, pues tiene la ventaja de analizar canales

independientes, medir niveles de  $E_c/I_0$ , asignación de códigos PN, handoff, medición de canales piloto y conexión vía puerto serial (para así poder ser utilizado simultáneamente con el GPS y automatizar las mediciones). Además es de bajo costo, ultraliviano y fácil de utilizar. Para más información visitar la página web de Berkeley Varitronics Systems: [www.bvsystems.com](http://www.bvsystems.com).

- Se recomienda hacer un mantenimiento al GPS de la unidad móvil del sistema TCI, pues todas las medidas presentaron error constante de aproximadamente 200 metros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. Henry L. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, USA: Prentice Hall PTR, 2000.
- [2]. Simon R. Saunders, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, Baffins Lane, Chichester, West Sussex U.K: John Wiley & Sons, Ltd., 1999.
- [3]. 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.
- [4]. Harry R. Anderson, "Building Corner Diffraction Measurements and Predictions Using UTD", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 46, No. 2, February 1998.
- [5]. Narcís Cardona Marcet y Andrés Navarro Cadavid, "Modelo de Simulación para Análisis de Capacidad en Sistemas W-CDMA Usando Herramientas de Planificación Basadas en GIS y MATLAB" *IEE Fisir International Communications Techonolgies*, Londres, U.K, Marzo 2000.
- [6]. John B. Groe and Lawrence E. Larson "CDMA MOBILE RADIO DESING". Artech House Boston- London, 2000.
- [7]. Holma, H., Toskala, A., "WCDMA For UMTS: Radio Access For Third Generation Mobile Communications", *John Wiley & Sons, Ltd.*, England, 2000.
- [8]. Anders Olsson, *Understanding Telecommunications II*, Ericsson Telecom, Telia and Studentlitteratur, 1997.
- [9]. Francisco Barceló, Javier Jordan "Caracterización de las conexiones". Alfaomega, Ra-Ma.
- [10]. Prasad, Ramjee, *CDMA for Wireles Personal Communications*, Artech House Inc, 1996.
- [11]. Viterbi, Andrew J. *CDMA Principles of Spread Spectrum Communication*, Addison – Wesley Publishing Company, 1995.

- [12]. Blaunstein, Nathan. Radio Propagation in Cellular Networks. Artech House – Boston\*London, 2000.
- [13]. Recomendación UIT-R. P.- 1406. Aspectos de la propagación relativos al servicio móvil terrestre terrenal en las bandas de ondas métricas y decimétricas. 1999.
- [14]. Recomendación UIT-R. P.- 1144-3. Guía para la aplicación de los métodos de propagación de la comisión de estudio 3 de radiocomunicaciones. 2001.
- [15]. Recomendación UIT-R. P. – 1407. Propagación por trayectos múltiples y parametrización de sus características. 1999.
- [16]. Recomendación UIT-R P. – 833 –3. Atenuación debida a la vegetación. 2001.
- [17]. Recomendación UIT-R P. 1238-2. Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones de interiores y redes de comunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 900 MHz a 100GHz. 2001.
- [18]. Comisión de Regulación de Telecomunicaciones. El sector de las telecomunicaciones en Colombia. 2001.
- [19]. Comisión de Regulación de Telecomunicaciones. Telefonía móvil Celular. 2001.
- [20]. Ministerio de Comunicaciones. Artículos en Página Web.
- [21]. Ericsson Student text EN/LZT 123 5215 R1A. The evolution from 2G to 3G. Ericsson Radio Systems. 1999.
- [22]. The CDMA2000 ITU-R RTT Candidate submission (0.18). ITU-R. 1998.
- [23]. Feick R., Grote W., Hristov H., Criterios y procedimientos para mediciones de propagación electromagnética en ambientes confinados. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso Chile. 2002.
- [24]. De Nayer. Ir. J. Meel., Spread Spectrum (SS). Belgium. 1999.
- [25]. Ericsson Core Unit Radio Systems and Technology. Digital Radio Transmision DT14 Spread Spectrum Techniques CDMA. Ericsson Radio

Systems AB. 1998.

- [26]. D.E Eliades, "Terrain Simulation for the Cascaded Cylinder diffraction Model," *IEE Proceedings-H*, Vol. 140, No. 4, August 1993
- [27]. 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.
- [28]. A. P. Garcia., "Cobertura para sistemas móviles celulares en entorno urbano escarpado". 2002.
- [29]. Parsons, L.D., *The Mobile Communications*, New Cork: Pentech Press, 1992.
- [30]. Lee W.Y.C., *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, New York: McGraw-Hill Publications, 1989.
- [31]. Milstein L. B., Et al, "On the feasibility of a CDMA overlay for ersonal communications networks", *IEEE Select. Areas in Commun*, Vol 10 No. 4, 1992.
- [32]. Xia H. H., et al, "Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal communications, *IEEE trans Antn Propagat*. Vol 41, No. 10, 1993.
- [33]. Voronovich A. G., *Wave scattering from Rough Surfaces*, New York: Springer Verlag, 1994.
- [34]. Ishimaru A., "Electromagnetic Wave Propagation, Radiation and Scattering, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991
- [35]. Chew. W. C., "Waves and Fields in inhomogeneous Media", New York: IEEE Press, 1995
- [36]. Mehrotra A., "Cellular radio Performance Engineering, Norwood, M.A: Artech House, 1994
- [37]. Hacking K., "Propagation over rounded hills", BBC Research Report, RA-21, 1968.
- [38]. Blaustein N., and V. Levin, "Parametric Model of UHF/L-Wave propagation in city with randomly distributed buildings, "Proc. Of IEEE

- Antennas and Propagation Society". Int. Symp, Atlanta, Georgia, June 21-26, 1998, Vol 3 pp 1684-1687.
- [39]. Rappaport. T. S. Wireless Communications: Principles and Practice, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 1996.
- [40]. Garcia, A. Paolo, "Propagación en canales de radio para comunicaciones móviles satelitales y terrestres: Efectos a pequeña escala", Paper. 2003.
- [41]. Garcia A. Paolo, "Procesado espacio-temporal para canales de multiples entradas y múltiples salidas (MIMO) en sistemas DS-CDMA de cuarta generación en entornos urbanos con terreno irregular", Tesis de Doctorado en curso, Universidad Industrial de Santander- Universidad Politécnica de Valencia. 2004.
- [42]. T.Rappaport & McGillem, "UHF Fading in Factories", IEEE JSAC, Vol. 7, N°1, Ene 1989, pp. 40- 48
- [43]. S.Y.Seidel & T.S.Rappaport, "914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Building", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 40, pp.207 – 214, Feb. 1992.
- [44]. Prasad, Ramjee, CDMA for Wireless Personal Communications, Artech House Inc., 1996.
- [45]. Lee, W.C.Y., Mobile Communications Desing Fundamentals, 2<sup>a</sup> edición, Wiley-Interscience, 1993.
- [46]. Mehrotra, Asha, Cellular Radio: Analog and Digital Systems, Artech House, Inc 1994.
- [47]. Lee, W.C.Y., Mobile Cellular Communications McGraw-Hill Inc. 1995.
- [48]. Gilhousen, K.S.I.M. Jacobs, R. Padovani, A.J.Viterbi, L.A. Weaver y C.E. Wheatley, III; " On the capacity of a cellular CDMA System", IEEE Transactions on vehicular Tecnology, Vol.40 No. 2, mayo 1991.
- [49]. Viterbi, A.J., A.M. Viterbi, K. Gilhousen y E. Zehavi, "Soft handoff Extends CDMA Cell Coverage and Increases Reverse Link Capacity", IEEE Journal on Selected Areas in communications, Vol. 12, No 8, octubre, 1994.

- [50]. TIA/EIA/IS-95-A+TSB74, "Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular System plus Telecommunications System Bulletin: Support for 14.4 kbps Data Rate and PCS Interaction for Wideband Spread Spectrum Cellular Systems", 27 de febrero, 1996.
- [51]. 3GPP2 IS-2002.2, Physical Layer Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems.
- [52]. 3GPP2 IS-2002.3. Medium Access Control (MAC) Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems.
- [53]. 3GPP2 IS-2002.4, Signaling Layer 2 Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems.
- [54]. 3GPP2 IS-2002.5. Upper Layer (Layer 3) Signaling Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems.
- [55]. Gallo S. Fideligna, Prieto G. Martha. "Análisis y comprobación de los niveles de densidad de potencia en las inmediaciones de una celda sectorizada en un entorno andino utilizando sistemas de información geográfica (GIS) y MATLAB.

## ANEXO A

### MEDIDAS DE CAMPO: RESULTADOS ESTADÍSTICAS POR RUTA SEGÚN EL BARRIO

**Tabla A.1: BARRIO PROVENZA.**

**Sistema TCI: No. de Puntos: 40 Celulares: No. de Puntos: 60**

PROMEDIO DE LAS MEDICIONES POR PUNTO			
<b>Fecha:</b>	26/04/04	<b>Barrio:</b>	Provenza
<b>Precisión GPS:</b>	2 a 6 m	<b>Condición:</b>	Día Soleado.
<b>Posición Estación Base Provenza:</b>	Latitud 7° 5,126' N	<b>Ubicación en el Perfil:</b>	Terreno plano donde se encuentra la Estación Base
	Longitud 73° 7,000' W	<b>Equipos de medición:</b>	Sistema Integrado TCI ministerio de Comunicaciones y celulares Kyocera 3G CDMA
<b>Frecuencia Portadora:</b>	881,525 MHz	<b>Antena BS:</b>	DB874G90R - Decibel Products

dB $\mu$ V/m TCI	Celular Kyocera 1135	LATITUD [° ' ] N	LONGITUD [° ' ] W	dBm CAL. Formula CDMA TCI	Celular Kyocera Phantom
<b>VIA No. 1</b>					
99,79736328	-42	705,046886	-7306,529761	-39,32985583	-38
106,6953278	-40	705,044792	-7306,531958	-32,43189135	-37
108,0420609	-35	705,04323	-7306,534979	-31,08515826	-31
106,8370819	-31	705,057547	-7306,564642	-32,2901372	-35
107,3385696	-28	705,069529	-7306,586615	-31,78864947	-30
	-31	705,070782	-7306,583319		-32
102,283287	-39	705,071022	-7306,58277	-36,84393206	-39
	-47	705,072035	-7306,580573		-45
92,7787323	-46	705,071983	-7306,580298	-46,34848681	-45
	-47	705,071108	-7306,577277		-46
92,89807129	-48	705,070696	-7306,575079	-46,22914782	-50
	-47	705,072035	-7306,57453		-50
91,50262451	-49	705,071606	-7306,573157	-47,6245946	-46
	-45	705,071709	-7306,569861		-42
92,23503113	-43	705,071503	-7306,564642	-46,89218799	-44
	-37	705,072258	-7306,561896		-37

95,73487091	-42	705,072464	-7306,559973	-43,3923482	-39
	-46	705,071022	-7306,549811		-41
99,9226532	-37	705,072155	-7306,548163	-39,20456591	-34
	-34	705,070215	-7306,545966		-34
102,5556564	-41	705,071231	-7306,554265	-36,57156268	-35
	-39	705,072015	-7306,547238		-37
102,3354034	-37	705,071694	-7306,562841	-36,79181567	-37
96,2465744	-43	705,071555	-7306,558425	-42,88064471	-42
	-45	705,070904	-7306,562419		-44
88,63938141	-43	705,071921	-7306,557846	-50,4878377	-45
92,60807037	-43	705,072568	-7306,569973	-46,51914874	-46
91,55789185	-46	705,072233	-7306,561096	-47,56932727	-44
92,32740021	-49	705,070312	-7306,558476	-46,79981891	-49
97,72743225	-43	705,070117	-7306,568725	-41,39978686	-43

<b>VIA No. 2</b>					
80,30290222	-61	705,122005	-7306,403143	-58,82431689	-58
74,10435486	-59	705,12252	-7306,403693	-65,02286425	-62
77,45030212	-67	705,126348	-7306,406989	-61,67691699	-63
76,24280548	-67	705,128855	-7306,409735	-62,88441363	-65
73,38864898	-61	705,127705	-7306,40946	-65,73857013	-65
76,0280075	-63	705,131172	-7306,410834	-63,09921161	-61
	-60	705,133936	-7306,411932		-64
75,586586	-60	705,136305	-7306,413855	-63,54063311	-60
	-63	705,137575	-7306,415778		-64
71,81307983	-65	705,139807	-7306,4177	-67,31413928	-67
	-67	705,141832	-7306,419348		-65
73,15756988	-67	705,143824	-7306,421545	-65,96964923	-63
	-57	705,144768	-7306,423193		-60
74,92243957	-61	705,148149	-7306,426764	-64,20477954	-66
	-65	705,149317	-7306,426489		-63
69,97077942	-65	705,151102	-7306,428137	-69,15643969	-70
	-69	705,153299	-7306,430609		-68
73,7270813	-64	705,153763	-7306,431982	-65,40013781	-66
	-69	705,155376	-7306,433905		-64
73,07520294	-70	705,156939	-7306,436652	-66,05201617	-69
	-67	705,159545	-7306,437597		-64
78,39528656	-64	705,160194	-7306,440023	-60,73193255	-64
	-62	705,162354	-7306,442316		-65
72,81245422	-65	705,163594	-7306,443512	-66,31476489	-63
	-63	705,164659	-7306,445231		-63
79,95596313	-66	705,165894	-7306,447561	-59,17125598	-61
71,48433685	-69	705,168231	-7306,448465	-67,64288226	-64
72,35251617	-62	705,170056	-7306,450231	-66,77470294	-64
76,20633697	-61	705,171459	-7306,451936	-62,92088214	-63
75,97501373	-61	705,173456	-7306,453894	-63,15220538	-59

**Tabla A.2: BARRIO SAN LUIS.**

**Sistema TCI: No. de Puntos: 26 Celulares: No. de Puntos: 50**

<b>PROMEDIO DE LAS MEDICIONES POR PUNTO</b>			
<b>Fecha:</b>	26/04/04	<b>Barrio:</b>	San Luis
<b>Precisión GPS:</b>	2 a 6m	<b>Condición:</b>	Día Soleado.
<b>Posición Estación Base Provenza:</b>	Latitud 7° 5,126' N	<b>Ubicación en el Perfil:</b>	Cañón
	Longitud 73° 7,000' W	<b>Equipos de medición:</b>	Sistema Integrado TCI ministerio de Comunicaciones y celulares Kyocera 3G CDMA
<b>Frecuencia Portadora:</b>	881,525 MHz	<b>Antena BS:</b>	DB874G90R - Decibel Products

<b>dB <math>\mu</math>V/m TCI</b>	<b>Celular Kyocera 1135</b>	<b>LATITUD [° ' ] N</b>	<b>LONGITUD [° ' ] W</b>	<b>dBm CAL. Formula CDMA TCI</b>	<b>Celular Kyocera Phantom</b>
<b>VIA No. 3</b>					
80,43360138	-61	705,346384	-7306,519873	-58,69361773	-62
	-63	705,346384	-7306,519873		-64
75,3398056	-67	705,345097	-7306,525916	-63,78741351	-65
	-59	705,345406	-7306,527289		-63
71,42369843	-61	705,345543	-7306,528662	-67,70352069	-62
	-67	705,345182	-7306,53031		-69
72,31929779	-57	705,344513	-7306,531958	-66,80792132	-63
	-63	705,344736	-7306,533057		-64
74,95239258	-61	705,344633	-7306,536902	-64,17482653	-64
	-69	705,344582	-7306,536902		-63
76,68576813	-65	705,344736	-7306,543494	-62,44145099	-65
	-64	705,345062	-7306,545691		-66
72,32239532	-66	705,345098	-7306,547686	-66,80482379	-65
	-67	705,345131	-7306,549182		-63
75,89280701	-66	705,345236	-7306,551377	-63,23441211	-70
	-67	705,345312	-7306,553473		-66
77,01141357	-65	705,345320	-7306,557868	-62,11580554	-67
	-64	705,345980	-7306,559761		-62
77,85431671	-60	705,346013	-7306,559925	-61,2729024	-63
	-62	705,346152	-7306,560014		-63
75,07262421	-61	705,346234	-7306,562592	-64,05459491	-63
	-63	705,346358	-7306,564387		-67
74,86936188	-68	705,346386	-7306,566123	-64,25785724	-65
	-74	705,346458	-7306,567812		-71
75,46321879	-63	705,346534	-7306,568891	-63,66400032	-65

**VIA No. 4**

77,66174316	-70	705,26778	-7307,114056	-61,46547595	-68
	-70	705,266115	-7307,115979		-65
80,68877411	-62	705,26663	-7307,118176	-58,438445	-63
	-68	705,267162	-7307,119156		-63
84,10697174	-66	705,268192	-7307,120374	-55,02024737	-65
	-67	705,269377	-7307,121198		-61
88,38776398	-61	705,270784	-7307,122296	-50,73945514	-62
	-63	705,272844	-7307,123395		-63
86,88486481	-62	705,273806	-7307,124219	-52,24235431	-63
	-65	705,275642	-7307,124768		-69
80,23696136	-60	705,276878	-7307,125317	-58,89025775	-56
	-60	705,278214	-7307,125867		-55
80,72795105	-63	705,279324	-7307,126816	-58,39926806	-57
	-60	705,280456	-7307,128969		-58
76,45890808	-61	705,281342	-7307,130513	-62,66831103	-56
	-60	705,284562	-7307,134574		-55
84,95615387	-57	705,286789	-7307,135619	-54,17106524	-54
	-65	705,288976	-7307,136468		-63
82,66963196	-60	705,289731	-7307,137754	-56,45758716	-60
	-59	705,291208	-7307,138193		-56
81,48787689	-55	705,293556	-7307,139461	-57,63934222	-60
	-60	705,294240	-7307,140556		-57
82,83653259	-60	705,295425	-7307,142069	-56,29068652	-56
	-61	705,297352	-7307,143294		-58
80,56025957	-57	705,300025	-7307,144129	-58,56695955	-56

**Tabla A.3: BARRIO BUCARAMANGA.**

**Sistema TCI: No. de Puntos: 20 Celulares: No. de Puntos: 40**

<b>PROMEDIO DE LAS MEDICIONES POR PUNTO</b>			
<b>Fecha:</b>	03/05/04	<b>Barrio:</b>	Bucaramanga
<b>Precisión GPS:</b>	2 a 6m	<b>Condición:</b>	Día Soleado
<b>Posición Estación Base Provenza:</b>	Latitud 7° 5,126' N	<b>Ubicación en el Perfil:</b>	Segunda colina a lo largo del perfil
	Longitud 73° 7,000' W	<b>Equipos de medición:</b>	Sistema Integrado TCI ministerio de Comunicaciones y celulares Kyocera 3G CDMA
<b>Frecuencia Portadora:</b>	881,525 MHz	<b>Antena BS:</b>	DB874G90R - Decibel Products

<b>dB <math>\mu</math>V/m TCI</b>	<b>Celular Kyocera 1135</b>	<b>LATITUD [° ' ] N</b>	<b>LONGITUD [° ' ] W</b>	<b>dBm CAL. Formula CDMA TCI</b>	<b>Celular Kyocera Phantom</b>
<b>VIA No. 5</b>					
68,934021	-72	705,328274	-7307,262646	-70,19319812	-67
	-69	705,327656	-7307,262372		-69
73,88163757	-72	705,328703	-7307,259625	-65,24558154	-68
	-72	705,330282	-7307,25578		-68
74,57341003	-72	705,331518	-7307,253583	-64,55380908	-65
	-73	705,331518	-7307,251385		-73
67,22863007	-64	705,332497	-7307,248639	-71,89858905	-68
	-67	705,334368	-7307,245618		-67
79,28956604	-65	705,335003	-7307,242596	-59,83765307	-64
	-68	705,335861	-7307,239301		-67
82,34043884	-60	705,338333	-7307,233533	-56,78678027	-66
	-60	705,337973	-7307,233258		-63
84,40730286	-65	705,339088	-7307,230511	-54,71991626	-65
	-65	705,340857	-7307,225293		-64
91,06711578	-63	705,340479	-7307,225568	-48,06010333	-61
	-66	705,342041	-7307,220624		-64
89,21195221	-67	705,341595	-7307,220349	-49,9152669	-62
	-61	705,343534	-7307,218152		-61
90,87512207	-59	705,344238	-7307,215955	-48,25209704	-60
	-58	705,345612	-7307,214581		-60
89,80387115	-57	705,346489	-7307,212652	-49,32334796	-64
	-57	705,346894	-7307,210564		-55
92,24772644	-51	705,347465	-7307,209858	-46,87949267	-51
	-55	705,348964	-7307,207451		-52
87,77173615	-51	705,349564	-7307,205646	-51,35548297	-48
	-46	705,351489	-7307,204051		-43
92,59716797	-53	705,353156	-7307,201238	-46,53005114	-49

	-48	705,355694	-7307,199857		-48
92,11692047	-49	705,357486	-7307,197644	-47,01029864	-50
	-52	705,359465	-7307,195692		-51
92,46313477	-57	705,360236	-7307,193151	-46,66408435	-54
	-47	705,362014	-7307,190564		-51
92,86086273	-50	705,364231	-7307,189128	-46,26635638	-50
	-50	705,366143	-7307,187523		-44
92,89250946	-49	705,368144	-7307,185624	-46,23470965	-55
	-50	705,369472	-7307,183698		-52
93,99305725	-56	705,370615	-7307,181938	-45,13416186	-53
	-46	705,371964	-7307,180001		-50
92,59757233	-50	705,373226	-7307,178221	-46,52964679	-46
	-47	705,375045	-7307,176974		-44

**Tabla A.4: BARRIO LA VICTORIA.**

**Sistema TCI: No. de Puntos: 15 Celulares: No. de Puntos: 45**

<b>PROMEDIO DE LAS MEDICIONES POR PUNTO</b>			
<b>Fecha:</b>	03/05/04	<b>Barrio:</b>	La Victoria
<b>Precisión GPS:</b>	2 a 6m	<b>Condición:</b>	Día Soleado
<b>Posición Estación Base Provenza:</b>	Latitud 7° 5,126' N	<b>Ubicación en el Perfil:</b>	Segunda colina a la altura de la estación Base
	Longitud 73° 7,000' W	<b>Equipos de medición:</b>	Sistema Integrado TCI ministerio de Comunicaciones y celulares Kyocera 3G CDMA
<b>Frecuencia Portadora:</b>	881,525 MHz	<b>Antena BS:</b>	DB874G90R - Decibel Products

<b>dB <math>\mu</math>V/m TCI</b>	<b>Celular Kyocera 1135</b>	<b>LATITUD [° ' ] N</b>	<b>LONGITUD [° ' ] W</b>	<b>dBm CAL. Formula CDMA TCI</b>	<b>Celular Kyocera Phantom</b>
<b>VIA No. 6</b>					
83,34615326	-59	705,491592	-7306,584418	-55,78106585	-60
	-60	705,492468	-7306,584692		-60
	-58	705,494099	-7306,583044		-59
81,98967743	-60	705,494047	-7306,581122	-57,13754168	-61
	-59	705,494751	-7306,578651		-64
	-57	705,495455	-7306,576178		-57
84,57146454	-59	705,496862	-7306,576178	-54,55575457	-55
	-57	705,497377	-7306,573706		-60
	-61	705,498974	-7306,570959		-63
74,94254303	-66	705,498339	-7306,565192	-64,18467608	-64
	-61	705,501686	-7306,566016		-56
	-61	705,503197	-7306,560522		-58
80,41815948	-63	705,504244	-7306,563544	-58,70905963	-60
	-64	705,505995	-7306,562994		-59
	-58	705,506871	-7306,561346		-57
82,68627929	-60	705,507240	-7306,557583	-56,44093982	-60
	-63	705,507890	-7306,560245		-63
	-64	705,508240	-7306,558689		-57
80,31482696	-53	705,508750	-7306,556423	-58,81239215	-59
	-60	705,509120	-7306,549745		-54
	-57	705,509852	-7306,547621		-51
82,62456512	-54	705,510235	-7306,545123	-56,50265399	-57
	-56	705,511289	-7306,542139		-51
	-59	705,513697	-7306,540136		-54
78,44700622	-54	705,514551	-7306,540031	-60,68021289	-53
	-52	705,515689	-7306,538924		-50
	-57	705,515963	-7306,540058		-55
77,99487304	-49	705,517212	-7306,537951	-61,13234607	-53

	-52	705,518074	-7306,535661		-51
	-58	705,518931	-7306,532987		-48
85,15459442	-51	705,519268	-7306,530048	-53,97262469	-51
	-57	705,520659	-7306,528594		-52
	-44	705,522244	-7306,526548		-45
87,5389862	-49	705,523654	-7306,521482	-51,58823291	-56
	-55	705,525893	-7306,521346		-55
	-53	705,526497	-7306,519873		-59
89,85049438	-54	705,527821	-7306,518994	-49,27672473	-52
	-48	705,528900	-7306,518994		-52
	-53	705,529752	-7306,516489		-51
89,03086853	-46	705,531201	-7306,513459	-50,09635058	-47
	-51	705,532821	-7306,512644		-48
	-48	705,533045	-7306,511149		-47
86,15031433	-48	705,534752	-7306,508745	-52,97690478	-48
	-47	705,536201	-7306,507412		-46
	-51	705,538736	-7306,505987		-46

**TABLA A.5 ESTADÍSTICAS POR RUTA SEGÚN EL BARRIO.  
MEDICIONES EQUIPO TCI DEL MINISTERIO DE  
COMUNICACIONES**

RUTA 1 PROVENZA	RUTA 2 PROVENZA	RUTA 3 SAN LUIS	RUTA 4 SAN LUIS	RUTA 5 BUCARAMANGA	RUTA 6 LA VICTORIA
MEDIANA [dBm]					
-42,1402158	-64,6138219	-63,7874135	-57,6393422	-48,7877225	-56,4409398
PROMEDIO [dBm]					
-41,1240449	-64,2796357	-63,7702421	-56,9991889	-53,06953135	-56,1231654
DESVIACIÓN ESTÁNDAR [dBm]					
6,21531512	2,77990271	2,43583555	3,3798882	8,654278708	4,19947886
VARIANZA [dBm]					
38,630142	7,7278591	5,93329481	11,4236443	74,89653996	17,6356227
CANTIDAD DE DATOS					
20	20	13	13	20	15
MÍNIMO [dBm]					
-50,4878377	-69,1564397	-67,7035207	-62,668311	-71,89858905	-64,1846761
MÁXIMO [dBm]					
-31,0851583	-58,8243169	-58,6936177	-50,7394551	-45,13416186	-49,2767247

- Ruta 3: Valores estadísticos para el cálculo de Shadowing.

**TABLA A.6.1 ESTADÍSTICAS POR RUTA SEGÚN EL BARRIO.  
MEDICIONES CELULAR KYOCERA 1135 3G CDMA.**

RUTA 1 PROVENZA	RUTA 2 PROVENZA	RUTA 3 SAN LUIS	RUTA 4 SAN LUIS	RUTA 5 BUCARAMANGA	RUTA 6 LA VICTORIA
MEDIANA [dBm]					
-43	-64	-64	-61	-57,5	-57
PROMEDIO [dBm]					
-41,4333333	-64	-64,12	-62,08	-58,475	-55,6888889
DESVIACIÓN ESTÁNDAR [dBm]					
5,63047945	3,35281662	3,65513338	3,89358447	8,617178728	5,38441447
VARIANZA [dBm]					
31,7022989	11,2413793	13,36	15,16	74,25576923	28,9919192
CANTIDAD DE DATOS					
30	30	25	25	40	45
MÍNIMO [dBm]					
-49	-70	-74	-70	-73	-66
MÁXIMO [dBm]					
-28	-57	-57	-55	-46	-44

**TABLA A.6.2 ESTADÍSTICAS POR RUTA SEGÚN EL BARRIO.  
MEDICIONES CELULAR KYOCERA PHANTOM 3G CDMA.**

RUTA 1 PROVENZA	RUTA 2 PROVENZA	RUTA 3 SAN LUIS	RUTA 4 SAN LUIS	RUTA 5 BUCARAMANGA	RUTA 6 LA VICTORIA
MEDIANA [dBm]					
-41,5	-64	-64	-60	-60	-55
PROMEDIO [dBm]					
-40,5666667	-63,7666667	-64,8	-59,96	-57,8	-54,7555556
DESVIACIÓN ESTÁNDAR [dBm]					
5,66101814	2,73777324	2,44948974	4,26692708	8,431321337	5,26202327
VARIANZA [dBm]					
32,0471264	7,4954023	6	18,2066667	71,08717949	27,6888889
CANTIDAD DE DATOS					
30	30	25	25	40	45
MÍNIMO [dBm]					
-50	-70	-71	-69	-73	-64
MÁXIMO [dBm]					
-30	-58	-62	-54	-43	-45

- Ruta 3: Valores estadísticos para el cálculo de Shadowing.

**Tabla A.7: DISTRIBUCIÓN DE SHADOWING**

**RUTA 3**

**Sistema TCI: No. de Puntos: 13 Celulares: No. de Puntos: 25**

Medición Sistema Integrado TCI (dBm)		Celular 1135 CDMA (dBm)		Celular PHANTOM CDMA (dBm)	
Pr – Mediana*	Densidad de probabilidad	Pr – Mediana*	Densidad de probabilidad	Pr – Mediana*	Densidad de probabilidad
5,093795776	0,897267212	3	0,00175157	2	0,00175157
		1	0,00501869	0	0,00501869
0		-3	0,02727098	-1	0,02727098
		5	0,07216152	1	0,07216152
-3,91610718	0,85266323	3	0,1354397	2	0,1354397
		-3	0,1354397	-5	0,1354397
-3,02050781	0,79741254	7	0,28775545	1	0,28775545
		1	0,36496459	0	0,36496459
-0,38741302	0,191604714	3	0,50543369	0	0,50543369
		-5	0,50543369	1	0,50543369
1,345962524	0,564178295	-1	0,61085593	-1	0,61085593
		0	0,6205077	-2	0,6205077
-3,01741028	0,797172216	-2	0,668412	-1	0,668412
		-3	0,668412	1	0,668412
0,553001404	0,282087107	-2	0,668412	-6	0,668412
		-3	0,71045237	-2	0,71045237
1,671607971	0,63359764	-1	0,71045237	-3	0,71045237
		0	0,71045237	2	0,71045237
2,514511108	0,751827033	4	0,74718429	1	0,74718429
		2	0,74718429	1	0,74718429
-0,2671814	0,118926873	3	0,74718429	1	0,74718429
		1	0,74718429	-3	0,74718429
-0,47044373	0,238592083	-4	0,85217225	-1	0,85217225
		-10	0,00175157	-7	0,00175157
0,123413189	0,034273282	1	0,00501869	-1	0,00501869

\*Potencia recibida por el equipo TCI o celular menos la mediana de cada población dada en dBm.

## **ANEXO B**

### **SIMULACIONES EN CELLVIEW: RESULTADOS**

#### **TABULACION ESTADISTICA DE MEDIDAS DE CAMPO CONFRONTADAS CON LAS SIMULACIONES**

**Tabla B.1: SIMULACIONES BARRIO PROVENZA.**

**RUTA 1**

**Sistema TCI: No. de Puntos: 20 Celulares: No. de Puntos: 30**

Medición Sistema Integrado TCI (dBm)		Modelo Walfish-Ikegami Modificado UIS	Celulares CDMA (dBm)	
Omnidireccional	Sectorizado		Omnidireccional	Sectorizado
-34,227867	-45,231575		-42,186981	-50,004494
-33,590385	-42,580864		-39,664284	-46,461258
-34,227867	-40,331581		-42,186981	-45,104492
-34,984565	-37,139221		-34,86747	-34,97718
-37,302345	-36,277039		-37,781509	-36,675682
			-44,151802	-48,264008
-44,768623	-39,927055		-39,407303	-40,704079
			-41,763176	-48,046799
-42,287346	-45,202904		-40,065323	-42,124367
			-49,104576	-46,987694
-52,636734	-43,374329		-49,496048	-43,945786
			-41,133701	-41,315048
-37,372154	-46,582214		-37,932732	-47,199745
			-35,819977	-53,147858
-35,153496	-54,017014		-35,714066	-54,577583
			-40,271996	-55,712685
-30,850245	-55,63063		-39,344826	-56,1912
			-36,684715	-55,941444
-35,360142	-55,488251		-35,977673	-56,105782
			-36,359909	-54,22176
-35,907555	-53,674469		-36,525085	-54,292
			-36,886158	-54,326534
-36,404385	-53,863499		-37,021915	-54,48103
-36,558033	-54,101589		-37,175564	-54,71912
			-38,123764	-54,66732
-31,01482	-45,858379		-31,585674	-46,429234
-30,889988	-45,43354		-31,702198	-46,545757
-31,002651	-45,546211		-31,577366	-46,120926
-33,777733	-45,167767		-31,790029	-46,344994
-34,016769	-45,384411		-34,465103	-45,855145

**Tabla B.2: SIMULACIONES BARRIO PROVENZA.**

**ruta 2**

**Sistema TCI: No. de Puntos: 20 Celulares: No. de Puntos: 30**

Medición Sistema Integrado TCI (dBm)		Modelo Walfish-Ikegami Modificado UIS	Celulares CDMA (dBm)	
Omnidireccional	Sectorizado		Omnidireccional	Sectorizado
-89,8265	-62,759857		-91,970703	-66,086487
-88,531746	-68,387726		-90,675949	-70,531921
-88,387466	-68,653915		-90,53167	-70,798111
-89,459373	-70,013474		-91,603577	-72,157677
-86,514442	-68,918259		-88,658638	-71,062462
-86,887489	-68,947037		-89,031693	-71,091232
			-89,912361	-71,155632
-88,621597	-69,855507		-90,205223	-71,439125
			-90,18187	-70,752541
-88,96772	-69,952698		-90,551346	-71,536324
			-90,189323	-71,541908
-90,00676	-72,281219		-91,590385	-72,807869
			-91,668259	-72,923096
-90,072365	-72,034981		-91,655991	-73,618607
			-92,593239	-73,94355
-90,600883	-72,780014		-92,184509	-74,363632
			-88,740234	-70,917694
-86,353523	-68,746185		-87,937149	-70,329811
			-87,105263	-69,586304
-85,232826	-68,976318		-86,816452	-70,559944
			-86,807045	-69,75061
-82,283669	-65,78334		-84,427842	-67,927544
			-84,872635	-66,667542
-81,609074	-70,687149		-83,75367	-66,969429
			-89,699608	-73,529236
-87,778969	-68,771065		-87,685844	-70,915268
-85,541641	-71,261063		-87,426811	-72,844688
-88,538254	-74,332809		-92,059067	-75,916435
-91,97081	-77,291046		-93,554436	-78,874672
-91,987251	-78,104179		-93,570877	-79,687805

**Tabla B.3: SIMULACIONES BARRIO SAN LUIS**

**RUTA 3**

**Sistema TCI: No. de Puntos: 13 Celulares: No. de Puntos: 25**

Medición Sistema Integrado TCI (dBm)		Modelo Walfish-Ikegami Modificado UIS	Celulares CDMA (dBm)	
Omnidireccional	Sectorizado		Omnidireccional	Sectorizado
-51,343801	-38,624229		-48,48719	-33,164204
			-47,806999	-30,914303
-52,148674	-35,659092		-46,688652	-30,199066
			-60,955093	-42,69125
-58,286105	-40,117443		-59,870331	-42,261639
			-59,220436	-42,261639
-56,837669	-41,252174		-58,421288	-42,8658
			-58,208122	-42,457848
-50,515793	-40,943932		-45,055773	-42,52755
			-59,669121	-42,755569
-56,995827	-41,252167		-59,140022	-42,835793
			-46,580559	-42,386238
-51,203407	-39,171524		-45,743378	-40,755142
			-59,37703	-41,270569
-57,926842	-35,988823		-59,510468	-30,528795
			-54,112869	-34,220184
-56,652306	-44,151779		-51,192276	-38,69175
			-55,647568	-34,378057
-43,6418	-42,323807		-38,18177	-36,863777
			-34,761826	-34,392456
-44,444313	-40,165279		-46,027931	-34,705257
			-48,848869	-33,111042
-42,213631	-44,155323		-36,753609	-38,695293
			-39,560318	-38,260877
-41,602493	-38,25639		-36,142471	-32,796364
			-48,48719	-33,164204
-53,94702	-36,374329		-47,806999	-30,914303
			-46,688652	-30,199066
-59,371468	-41,107624		-60,955093	-42,69125
			-59,870331	-42,261639

**Tabla B.4: SIMULACIONES BARRIO SAN LUIS**

**RUTA 4**

**Sistema TCI: No. de Puntos: 13    Celulares: No. de Puntos: 25**

Medición Sistema Integrado TCI (dBm)		Modelo Walfish-Ikegami Modificado UIS	Celulares CDMA (dBm)	
Omnidireccional	Sectorizado		Omnidireccional	Sectorizado
-52,9739	-63,989029		-48,487404	-58,529007
			-48,487404	-58,79805
-50,516823	-59,545047		-45,056801	-54,084038
			-44,044807	-54,340652
-46,645515	-65,039254		-41,185486	-59,576264
			-56,126495	-58,878906
-54,019882	-69,305031		-48,55986	-63,845009
			-51,675301	-63,845009
-58,773674	-68,852638		-53,313644	-63,392609
			-51,010574	-61,268772
-63,300972	-73,895348		-57,84095	-68,435318
			-58,155197	-68,396317
-60,590141	-61,895878		-55,130119	-56,435848
			-44,400108	-55,200695
-47,669441	-59,230854		-42,209412	-53,770832
			-46,384422	-52,329277
-51,4105	-57,034897		-45,950478	-51,574867
			-44,957649	-51,427666
-50,096718	-56,887688		-44,636696	-51,427666
			-44,636696	-50,688698
-49,333527	-56,148727		-43,873505	-50,688698
			-43,873505	-50,506081
-48,386993	-54,960449		-42,926994	-49,500427
			-42,998543	-49,500427
-48,458565	-54,628342		-42,998543	-49,16832
			-48,487404	-58,529007
-53,947433	-64,258072		-48,487404	-58,79805
			-45,056801	-54,084038
-49,504837	-59,800674		-44,044807	-54,340652
			-41,185486	-59,576264

**Tabla B.5: SIMULACIONES BARRIO BUCARAMANGA**

**RUTA 5**

**Sistema TCI: No. de Puntos: 20 Celulares: No. de Puntos: 40**

Medición Sistema Integrado TCI (dBm)		Modelo Walfish-Ikegami Modificado UIS	Celulares CDMA (dBm)	
Omnidireccional	Sectorizado		Omnidireccional	Sectorizado
-66,912186	-66,122147		-61,452164	-60,662117
			-49,990669	-62,491325
-68,520693	-69,497177		-63,060623	-64,037148
			-64,342773	-63,128113
-73,07695	-65,516479		-67,61692	-60,056458
			-71,124266	-65,526871
-72,474937	-75,591721		-67,014915	-70,131661
			-52,51976	-65,123497
-71,381653	-70,162735		-65,921623	-64,702698
			-52,475105	-50,81094
-58,971626	-57,549122		-53,511604	-52,089092
			-79,821938	-79,004471
-80,612465	-81,386917		-80,013199	-80,843842
			-52,856415	-51,521431
-58,463547	-55,816864		-53,003517	-50,356834
			-52,578712	-50,707619
-57,855598	-56,57386		-52,395576	-51,113831
			-52,166763	-51,417053
-57,263443	-56,527496		-51,338684	-50,963112
			-51,447807	-50,801626
-57,415909	-56,080185		-51,955887	-50,620163
			-46,194908	-49,611752
-60,616806	-57,650139		-55,156784	-64,962776
			-60,319603	-58,607719
-70,808876	-63,447441		-65,348854	-57,987411
			-53,669327	-60,475006
-62,489609	-56,749916		-57,029579	-51,289894
			-70,810486	-48,192493
-55,817146	-53,906811		-50,357117	-48,446781
			-50,347984	-49,168377
-56,059494	-44,550648		-50,599472	-36,591846
			-50,967018	-48,296696
-56,114685	-69,844353		-50,654663	-64,384323
			-70,799477	-64,481856
-55,933708	-53,234287		-50,473679	-47,774265
			-49,767426	-47,889172
-54,567848	-52,892662		-49,107826	-47,43264
			-48,679451	-47,103874
-54,392754	-52,428299		-48,932732	-46,968277
			-65,483917	-47,650291

**Tabla B.6: SIMULACIONES BARRIO LA VICTORIA.**

**RUTA 6**

**Sistema TCI: No. de Puntos: 20 Celulares: No. de Puntos: 40**

Medición Sistema Integrado TCI (dBm)		Modelo Walfish-Ikegami Modificado UIS	Celulares CDMA (dBm)	
Omnidireccional	Sectorizado		Omnidireccional	Sectorizado
-95,727242	-101,182381		-95,614952	-101,070091
			-95,615486	-100,358582
			-96,057578	-100,35759
-96,544014	-100,65654		-96,43174	-100,544258
			-95,504074	-101,258362
			-95,915253	-100,133247
-95,455673	-99,785995		-95,341278	-99,673714
			-95,753571	-99,951469
			-95,297653	-99,952446
-96,717049	-101,809509		-96,600456	-101,692917
			-96,601555	-101,341339
			-96,602242	-100,882142
-97,13308	-100,99942		-97,016487	-100,882828
			-97,389946	-100,854797
			-97,389702	-101,8237
-97,403038	-101,094238		-97,286446	-100,975372
			-96,40966	-100,976768
			-97,180992	-101,350693
-97,303825	-100,784973		-97,182594	-100,661263
			-96,838982	-100,6632
			-95,725731	-100,456179
-96,723198	-101,103439		-96,59948	-100,979736
			-96,881645	-101,167992
			-97,54966	-101,784622
-98,398567	-102,952652		-98,277321	-102,828949
			-97,07534	-102,025085
			-96,788414	-102,83934
-95,883003	-103,769638		-95,745285	-103,645935
			-95,215607	-100,762589
			-95,24437	-100,770638
-95,39151	-101,231033		-95,253792	-101,093315
			-91,71019	-101,100716
			-95,776253	-100,860825
-96,534889	-101,790504		-96,40313	-101,65583
			-96,406929	-101,663628
			-71,809807	-102,993843
-71,941599	-78,530334		-71,30574	-78,398532
			-71,693298	-77,721146
			-96,383934	-77,531281

-96,007706	-102,055748	-96,386055	-101,921089
		-95,869987	-101,418434
		-96,190071	-101,733391
-99,966225	-105,747513	-99,798027	-105,574524
		-99,864265	-105,258484
		-99,302345	-105,220657

**Tabla B.7. Mediciones Equipo especializado TCI Ministerio de Comunicaciones Dirección territorial Bucaramanga confrontadas con las simulaciones.**

DESEMPEÑO DEL MODELO COST231 WALFISH – IKEGAMI MODIFICADO (ANTENA OMNIDIRECCIONAL)									
R U T A	Coefficiente correlación	Error típico	Dif. mínima	Dif. máxima	Mediana	Promedio	STD	varianza	Intervalo confianza
1	-0,011963	5,38768	0,38743	7,92469	-4,58156	-5,00735	8,18006	66,9134	2,92714
2	-0,069496	2,85716	15,2943	31,0021	23,6485	23,67898	4,07139	16,5762	1,45690
3	0,204385	6,38050	5,30757	-5,30757	-11,6387	-12,7077	6,21809	38,6646	2,43744
4	-0,117494	5,48670	2,19087	6,53131	-7,90369	-4,52406	6,60352	43,6065	2,58853
5	0,702078	5,68905	0,57634	25,8925	9,20337	9,417965	6,39290	40,8692	1,98114
6	0,458199	6,02128	22,6648	46,9893	39,9461	39,01887	5,92675	49,2537	1,73164
<b>P</b>	<b>0,1942</b>	<b>5,3037</b>	<b>7,7368</b>	<b>18,8387</b>	<b>8,1123</b>	<b>8,3127</b>	<b>6,2321</b>	<b>42,647</b>	<b>2,1871</b>
DESEMPEÑO DEL MODELO COST231 WALFISH – IKEGAMI MODIFICADO (ANTENA SECTORIZADA)									
R U T A	Coefficiente correlación	Error típico	Dif. mínima	Dif. máxima	Mediana	Promedio	STD	varianza	Intervalo confianza
1	0,353970	5,79640	1,04238	17,1029	4,66873	5,416582	6,96252	48,4767	2,49145
2	0,399623	3,30615	2,63855	14,9519	5,44961	6,147256	3,50023	12,2516	1,25251
3	-0,011431	2,76645	17,9640	-17,9640	-23,8893	-23,6116	3,61901	13,0972	1,41862
4	-0,263342	6,21142	0,43010	18,5655	2,52355	4,647978	7,77170	60,3994	3,04645
5	0,660666	7,00368	0,76234	26,6670	6,94804	7,706931	7,31558	53,5178	2,26708
6	0,437071	5,76573	29,2536	52,7706	44,6007	44,10976	5,75481	45,6455	1,68140
<b>P</b>	<b>0,2627</b>	<b>5,1416</b>	<b>8,68182</b>	<b>18,6823</b>	<b>6,7168</b>	<b>7,4028</b>	<b>5,8206</b>	<b>38,898</b>	<b>2,02625</b>

**Tabla B.8. Mediciones teléfonos móviles Kyocera 3G CDMA confrontadas con las simulaciones**

DESEMPEÑO DEL MODELO COST231 WALFISH – IKEGAMI MODIFICADO (ANTENA OMNIDIRECCIONAL) CELULAR KYOCERA 1135									
R U T A	Coefficiente correlación	Error típico	Dif. mínima	Dif. máxima	Mediana	Promedio	STD	varianza	Intervalo confianza
1	0,0347481	4,522410	0,021915	13,15180	-3,56504	-3,20773	7,052180	49,7332	2,52354
2	-0,365221	2,471956	16,81645	34,66825	25,79151	25,58872	4,943619	24,4393	1,76901
3	-0,074096	8,779809	1,129669	1,955093	-13,8077	-13,8814	9,607778	92,3094	3,76617
4	0,1861355	5,139266	1,844803	-1,84480	-14,3633	-14,5231	5,82734	33,9579	2,28427
5	0,2660432	8,706385	0,232574	22,81048	-1,76387	-1,19226	10,62362	112,861	3,29223
6	0,1659089	6,395960	17,30574	52,86426	38,72573	39,13971	7,658107	58,6466	2,23750
<b>P</b>	<b>0,035586</b>	<b>6,00263</b>	<b>6,22519</b>	<b>20,6008</b>	<b>5,16955</b>	<b>5,32065</b>	<b>7,6187</b>	<b>61,991</b>	<b>2,64545</b>

DESEMPEÑO DEL MODELO COST231 WALFISH – IKEGAMI MODIFICADO (ANTENA SECTORIZADA) CELULAR KYOCERA 1135									
R U T A	Coefficiente correlación	Error típico	Dif. mínima	Dif. máxima	Mediana	Promedio	STD	varianza	Intervalo confianza
1	0,1374680	6,031759	0,012306	20,22176	8,076176	7,283033	7,63175	58,2436	2,73093
2	-0,176704	3,038431	0,559944	18,68780	6,433067	7,676238	4,90271	24,0366	1,75438
3	-0,053475	4,656333	14,1342	-14,1342	-26,2947	-26,2803	5,99859	35,9821	2,35137
4	0,3123354	5,784233	0,845009	8,435318	-7,67072	-5,85562	6,01595	36,1917	2,35821
5	0,4005034	8,658586	0,192493	19,00447	-2,93167	-2,63936	9,84262	96,8771	3,05020
6	0,0938796	6,145719	24,39853	58,25848	43,13324	44,24025	7,74997	60,0621	2,26434
<b>P</b>	<b>0,119001</b>	<b>5,71917</b>	<b>6,69041</b>	<b>18,4122</b>	<b>3,45756</b>	<b>4,07070</b>	<b>7,0235</b>	<b>51,898</b>	<b>2,41823</b>
DESEMPEÑO DEL MODELO COST231 WALFISH – IKEGAMI MODIFICADO (ANTENA OMNIDIRECCIONAL) CELULAR KYOCERA PHANTOM									
R U T A	Coefficiente correlación	Error típico	Dif. mínima	Dif. máxima	Mediana	Promedio	STD	varianza	Intervalo confianza
1	0,0047298	4,525093	0,021915	12,15180	-0,31824	-2,34106	7,181910	51,5798	2,56996
2	-0,217051	2,592084	17,81645	34,57087	26,04711	25,82205	4,171850	17,4043	1,49284
3	-0,067321	8,784037	2,044907	-2,04490	-15,8077	-14,5614	9,117207	83,1234	3,57387
4	0,0393743	5,226621	1,84095	3,155197	-13,4401	-12,4031	6,534988	42,7060	2,56166
5	0,198539	8,852086	0,032982	26,79947	-2,05415	-0,51726	10,98739	120,722	3,40496
6	-0,013174	6,485284	12,80980	53,86426	40,38970	40,07305	8,347936	74,5298	2,43905
<b>P</b>	<b>-0,00915</b>	<b>6,07753</b>	<b>5,76116</b>	<b>21,4161</b>	<b>5,80277</b>	<b>6,01204</b>	<b>7,7235</b>	<b>65,010</b>	<b>2,67372</b>
DESEMPEÑO DEL MODELO COST231 WALFISH – IKEGAMI MODIFICADO (ANTENA SECTORIZADA) CELULAR KYOCERA PHANTOM									
R U T A	Coefficiente correlación	Error típico	Dif. mínima	Dif. máxima	Mediana	Promedio	STD	varianza	Intervalo confianza
1	-0,099079	6,059609	0,02282	22,10578	10,01942	8,149700	8,635024	74,5636	3,08994
2	-0,033598	3,085265	1,559944	20,68780	7,388142	7,909571	4,153849	17,2544	1,48640
3	-0,133162	4,621478	19,73836	-19,7383	-26,7383	-26,9603	5,460361	29,8155	2,14042
4	0,3047574	5,799201	0,392609	13,39631	-5,42373	-3,73562	6,183348	38,2337	2,42382
5	0,3915194	8,695199	0,192493	20,48185	-4,03684	-1,96436	9,823965	96,5102	3,04442
6	0,0556520	6,163415	25,72114	59,25848	44,8237	45,17358	7,832908	64,9591	2,28857
<b>P</b>	<b>0,081014</b>	<b>5,73736</b>	<b>7,93789</b>	<b>19,3653</b>	<b>4,33873</b>	<b>4,76209</b>	<b>7,0149</b>	<b>53,556</b>	<b>2,41226</b>

- Nivel de confianza: 95%
- Valores estadísticos en dbm
- P= Promedio

## **ANEXO C**

### **PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DB874G90R**

DB874G90R-XY DECIBEL FRECUENCIA: 880 MHZ DOWNTILT: 0 GANANCIA 12.5 dBd  
Wide Band Panel Antenna V

**Tabla C.1. Patrón de radiación vertical**

0	0.000	60	26.800	120	27.700	180	30.000	240	25.200	300	22.100
1	0.000	61	27.000	121	27.800	181	30.800	241	25.600	301	22.200
2	0.200	62	27.000	122	27.900	182	31.500	242	26.000	302	22.000
3	0.400	63	26.900	123	28.300	183	32.200	243	26.400	303	21.600
4	0.700	64	26.700	124	28.800	184	32.700	244	26.900	304	21.100
5	1.100	65	26.200	125	29.400	185	32.900	245	27.400	305	20.500
6	1.600	66	25.800	126	30.000	186	33.100	246	28.000	306	19.800
7	2.300	67	25.300	127	30.900	187	33.200	247	28.600	307	19.200
8	3.100	68	24.800	128	32.000	188	33.200	248	29.300	308	18.600
9	4.000	69	24.400	129	33.400	189	32.800	249	29.800	309	18.100
10	5.200	70	23.800	130	35.100	190	32.300	250	30.400	310	17.700
11	6.500	71	23.400	131	37.900	191	31.500	251	30.600	311	17.400
12	8.000	72	23.300	132	40.000	192	31.200	252	30.800	312	17.100
13	9.800	73	23.000	133	40.000	193	31.100	253	30.500	313	17.000
14	12.000	74	22.800	134	40.000	194	30.900	254	30.200	314	16.900
15	14.500	75	22.600	135	37.500	195	30.500	255	30.000	315	16.900
16	17.300	76	22.600	136	34.100	196	30.500	256	29.400	316	17.100
17	18.900	77	22.600	137	31.300	197	31.200	257	28.800	317	17.300
18	18.200	78	22.500	138	29.300	198	31.500	258	28.100	318	17.700
19	16.300	79	22.600	139	27.700	199	32.000	259	27.300	319	18.300
20	14.400	80	22.600	140	26.400	200	32.600	260	26.500	320	19.000
21	12.900	81	22.700	141	25.300	201	33.400	261	25.900	321	20.000
22	11.900	82	22.800	142	24.400	202	34.200	262	25.200	322	21.300
23	11.100	83	23.100	143	23.800	203	34.800	263	24.600	323	22.800
24	10.600	84	23.300	144	23.200	204	35.900	264	24.000	324	24.400
25	10.300	85	23.400	145	22.800	205	37.300	265	23.400	325	25.900
26	10.100	86	23.800	146	22.500	206	37.900	266	23.100	326	26.200
27	10.200	87	24.200	147	22.300	207	38.400	267	22.600	327	25.000
28	10.400	88	24.400	148	22.400	208	38.100	268	22.100	328	23.100
29	10.700	89	24.800	149	22.500	209	38.000	269	21.600	329	21.200
30	11.100	90	25.400	150	22.700	210	37.900	270	21.200	330	19.700
31	11.700	91	26.000	151	23.100	211	37.500	271	20.800	331	18.400
32	12.500	92	26.700	152	23.600	212	37.200	272	20.400	332	17.500
33	13.300	93	27.200	153	24.400	213	36.700	273	20.100	333	16.900
34	14.300	94	27.900	154	25.200	214	36.400	274	19.800	334	16.500
35	15.400	95	28.400	155	26.300	215	36.500	275	19.500	335	16.400
36	16.700	96	29.200	156	27.800	216	36.300	276	19.200	336	16.700
37	18.300	97	29.900	157	29.600	217	35.700	277	18.900	337	17.300
38	20.100	98	30.900	158	31.900	218	35.600	278	18.700	338	18.400
39	22.300	99	31.800	159	35.000	219	35.500	279	18.500	339	20.300
40	25.000	100	32.500	160	38.700	220	34.300	280	18.200	340	23.300
41	28.400	101	33.400	161	40.000	221	33.400	281	18.100	341	29.800
42	32.400	102	33.900	162	37.100	222	32.000	282	17.900	342	35.400
43	35.300	103	34.200	163	33.600	223	31.100	283	17.800	343	24.200
44	33.300	104	34.000	164	31.300	224	30.100	284	17.700	344	18.600
45	29.800	105	33.600	165	29.500	225	29.200	285	17.600	345	15.100
46	27.700	106	33.100	166	27.900	226	28.500	286	17.700	346	12.300
47	26.300	107	32.400	167	26.900	227	27.600	287	17.700	347	10.200
48	25.100	108	31.500	168	26.100	228	26.900	288	17.800	348	8.400
49	24.500	109	30.800	169	25.600	229	26.300	289	17.900	349	6.800
50	24.000	110	30.100	170	25.300	230	25.700	290	18.100	350	5.500
51	23.800	111	29.400	171	25.300	231	25.400	291	18.300	351	4.400
52	23.800	112	28.900	172	25.300	232	25.000	292	18.600	352	3.400
53	23.800	113	28.500	173	25.600	233	24.800	293	19.000	353	2.600
54	24.100	114	28.300	174	25.800	234	24.600	294	19.400	354	1.900
55	24.500	115	28.000	175	26.300	235	24.700	295	19.900	355	1.400
56	24.900	116	27.900	176	26.900	236	24.500	296	20.400	356	0.900
57	25.400	117	27.700	177	27.600	237	24.600	297	21.000	357	0.500
58	25.900	118	27.600	178	28.400	238	24.800	298	21.500	358	0.200
59	26.400	119	27.700	179	29.300	239	24.900	299	21.900	359	0.100

\* Cada columna posee dos sub-columnas ordenadas así:

Grados Ganancia (dB)

DB874G90R-XY DECIBEL FRECUENCIA: 880 MHZ DOWNTILT: 0 GANANCIA 12.5 dBd  
Wide Band Panel Antenna

H

**Tabla C.2. Patrón de radiación horizontal**

0	0.000	60	4.900	120	17.200	180	24.100	240	16.300	300	5.200
1	0.000	61	5.100	121	17.500	181	24.200	241	16.100	301	5.100
2	0.000	62	5.200	122	17.700	182	24.200	242	15.900	302	4.900
3	0.000	63	5.300	123	18.000	183	24.100	243	15.700	303	4.800
4	0.000	64	5.500	124	18.300	184	24.200	244	15.500	304	4.600
5	0.100	65	5.700	125	18.500	185	24.200	245	15.300	305	4.500
6	0.100	66	5.800	126	18.600	186	24.400	246	15.000	306	4.300
7	0.100	67	6.000	127	18.800	187	24.600	247	14.800	307	4.200
8	0.100	68	6.100	128	19.200	188	24.800	248	14.600	308	4.000
9	0.200	69	6.300	129	19.400	189	24.800	249	14.500	309	3.900
10	0.200	70	6.400	130	19.700	190	25.100	250	14.200	310	3.800
11	0.200	71	6.600	131	19.800	191	25.300	251	14.000	311	3.600
12	0.200	72	6.700	132	20.100	192	25.600	252	13.800	312	3.500
13	0.300	73	6.900	133	20.200	193	25.900	253	13.600	313	3.400
14	0.300	74	7.100	134	20.500	194	26.200	254	13.400	314	3.200
15	0.400	75	7.200	135	20.800	195	26.500	255	13.200	315	3.100
16	0.400	76	7.400	136	21.000	196	26.700	256	13.000	316	3.000
17	0.500	77	7.600	137	21.200	197	26.900	257	12.800	317	2.900
18	0.600	78	7.700	138	21.500	198	27.200	258	12.500	318	2.800
19	0.600	79	7.900	139	21.700	199	27.400	259	12.400	319	2.700
20	0.700	80	8.000	140	22.000	200	27.500	260	12.200	320	2.600
21	0.800	81	8.200	141	22.200	201	27.600	261	12.000	321	2.400
22	0.800	82	8.400	142	22.500	202	27.300	262	11.800	322	2.300
23	0.900	83	8.600	143	22.800	203	27.200	263	11.600	323	2.200
24	1.000	84	8.800	144	23.100	204	27.000	264	11.400	324	2.100
25	1.100	85	9.000	145	23.600	205	26.700	265	11.200	325	2.000
26	1.100	86	9.200	146	23.900	206	26.400	266	11.000	326	1.900
27	1.200	87	9.400	147	24.300	207	26.000	267	10.800	327	1.800
28	1.300	88	9.600	148	24.500	208	25.700	268	10.600	328	1.700
29	1.400	89	9.800	149	25.000	209	25.200	269	10.500	329	1.600
30	1.400	90	10.000	150	25.300	210	24.900	270	10.200	330	1.500
31	1.500	91	10.200	151	25.500	211	24.400	271	10.100	331	1.400
32	1.600	92	10.400	152	25.800	212	24.100	272	9.900	332	1.300
33	1.700	93	10.600	153	26.100	213	23.600	273	9.700	333	1.200
34	1.800	94	10.800	154	26.200	214	23.100	274	9.500	334	1.200
35	1.900	95	11.100	155	26.400	215	22.700	275	9.300	335	1.100
36	2.000	96	11.300	156	26.700	216	22.400	276	9.100	336	1.000
37	2.100	97	11.500	157	26.700	217	21.900	277	9.000	337	0.900
38	2.200	98	11.800	158	26.900	218	21.600	278	8.800	338	0.800
39	2.300	99	12.000	159	27.000	219	21.200	279	8.600	339	0.800
40	2.400	100	12.200	160	26.900	220	20.900	280	8.400	340	0.700
41	2.500	101	12.500	161	26.800	221	20.600	281	8.200	341	0.600
42	2.600	102	12.700	162	26.700	222	20.200	282	8.100	342	0.600
43	2.700	103	12.900	163	26.500	223	20.000	283	7.900	343	0.500
44	2.800	104	13.200	164	26.600	224	19.800	284	7.700	344	0.400
45	3.000	105	13.400	165	26.400	225	19.500	285	7.600	345	0.400
46	3.100	106	13.700	166	26.200	226	19.200	286	7.400	346	0.300
47	3.200	107	13.900	167	26.000	227	19.000	287	7.200	347	0.300
48	3.300	108	14.200	168	25.900	228	18.700	288	7.100	348	0.200
49	3.500	109	14.400	169	25.600	229	18.500	289	6.900	349	0.200
50	3.600	110	14.700	170	25.400	230	18.300	290	6.700	350	0.200
51	3.700	111	14.900	171	25.300	231	18.100	291	6.600	351	0.100
52	3.800	112	15.200	172	25.100	232	17.900	292	6.400	352	0.100
53	4.000	113	15.500	173	24.900	233	17.700	293	6.200	353	0.100
54	4.100	114	15.700	174	24.700	234	17.500	294	6.100	354	0.100
55	4.200	115	15.900	175	24.600	235	17.300	295	5.900	355	0.100
56	4.400	116	16.200	176	24.800	236	17.100	296	5.800	356	0.000
57	4.500	117	16.500	177	24.500	237	16.900	297	5.600	357	0.000
58	4.600	118	16.700	178	24.300	238	16.700	298	5.500	358	0.000
59	4.800	119	16.900	179	24.400	239	16.500	299	5.300	359	0.000

\* Cada columna posee dos sub-columnas ordenadas así:

Grados Ganancia (dB)

## ANEXO D

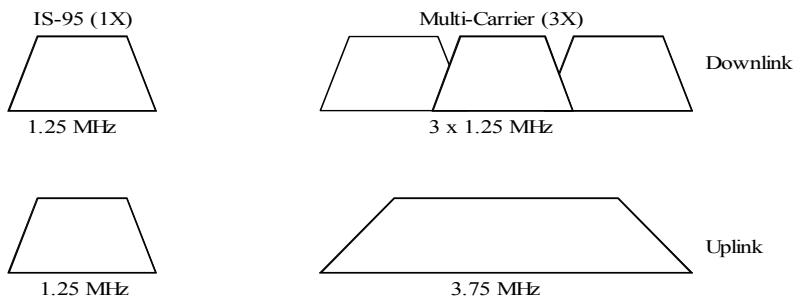
### MULTI-PORTADORA CDMA EN IMT-2000

#### D.1. Introducción

El presente estándar basado en la opción multi-portadora (MC) de cdma2000, está siendo regularizado por el Proyecto de sociedad de la tercera Generación II (3GPP2). El modo MC es como un camino natural de evolución para la red IS-95, ya que está desplegada en el mismo espectro de frecuencia. Para mayor detalle referirse a los estándares [51] a [54]. En Colombia, la empresa celular Bellsouth está haciendo uso de CDMA 2000 migrando de su estándar TDMA IS - 36.

El nombre para el modo MC (multi-portadora) viene de la dirección de transmisión del enlace de bajada (de la estación base al móvil), donde en vez de una portadora de banda ancha, se utilizan múltiples portadoras paralelas CDMA de banda angosta, las cuales son transmitidas de cada estación base. Cada velocidad de portadora es de 1.2288 Mcps, igual a la de IS-95. La dirección del enlace de subida es de ensanchamiento directo, con una tasa de 1.2288 Mcps. CDMA 2000 adoptará tres portadoras (Conocidas como modo 3X) a una tasa mayor a 3.6864 Mcps.

**Figura D.1 Relación entre el modo MC e IS-95 en uso de espectro.**



Como se ilustra en la figura D.1, tres portadoras IS-95 de banda angosta, cada una con 1.25 MHz, son unidas para formar una transmisión multiportadora en el enlace de bajada con aproximadamente 3.75 MHz (3X) de ancho de banda en un despliegue de 5 MHz. La siguiente sesión describe las principales características de la capa física del modo MC.

## **D.2 Canales CDMA**

- **Canales Lógicos**

Llevan datos sobre la interfaz aire y son dirigidos directamente a los canales físicos. Los siguientes canales lógicos son definidos en CDMA 2000:

1. Canal dedicado de tráfico (*f/r-dtch*). Un canal lógico punto a punto que porta tráfico de voz o datos sobre un canal físico dedicado.
2. Canales de Control Común (*f/r-cmch control*). Llevan mensajes MAC (Control de Acceso al Medio) con acceso compartido por varios terminales.
3. Canales de Señalización dedicados (*f/r-dsch*). Un canal lógico punto a punto que lleva tráfico de señalización en las capas superiores sobre un canal físico dedicado.
4. Canal de Señalización Común (*f/r-csch*). Un canal lógico punto a punto que lleva tráfico de señalización en las capas superiores sobre un canal físico, con acceso compartido por varios terminales.

- **Canales Físicos**

Provee básicamente funciones tales como el Canal de transmisión y canal de acceso aleatorio, que son esenciales para la operación básica de todo sistema celular. También el canal de búsqueda es necesario para ubicar móviles en el sistema. El canal correspondiente para uso de datos es el canal

supplemental, el cual se cubrirá en más detalle con transmisión de datos para el usuario.

Para evitar problemas de interferencia Near-Far, un canal común de control de potencia puede ser usado para transmitir información de control de potencia para el procedimiento de acceso aleatorio del enlace de subida. El modo MC emplea un canal de búsqueda rápida que es usado para indicar al terminal, donde está el canal de búsqueda actual.

### **D.3 Ensanche y modulación del modo multi-portadora**

- **Ensanche y modulación del enlace de subida**

En la modulación del enlace de subida diferentes canales son suministrados por una de las ramas I o Q y luego experimentan una compleja operación de scrambling, después del ensanche para balancear la potencia de las ramas. La transmisión multi-código es empleada cuando la tasa de datos aumenta. Cuando se utiliza una alta tasa de datos, el canal supplemental es utilizado en paralelo con el canal fundamental, quién solamente provee una limitada tasa de datos.

El ensanche en el enlace de subida es realizado con las funciones de Walsh. El código largo utilizado tiene un periodo de  $2^{42} - 1$  chips. El canal de acceso tiene un código específico con un periodo de  $2^{15}$  chips. Para la atenuación de canal adyacente, 40 dBm de atenuación en el nivel de señal deben ser alcanzados fuera de 4.44 MHz de ancho de banda.

- **Ensanche y modulación del enlace de bajada**

Las portadoras pueden ser operadas independientemente o el terminal puede demodularlas. La ventaja de recepción sobre todas las portadoras es la diversidad de frecuencia que es mejorada sobre una portadora de 1.2288

Mcps. Como cada portadora cuenta con un canal piloto para estimación del canal, pueden ser enviadas desde diferentes antenas, lo que permite diversidad adicional.

El canal sobre cada portadora es ensanchado con las funciones de Walsh usando un factor de ensanchamiento constante durante la conexión. Dichas funciones separan canales de la misma fuente y tienen ortogonalidad similar para transmisión de una sola fuente. El factor de ensanche para transmisión de datos está entre 4 y 256. El enlace de bajada es caracterizado por el uso de un código a lo largo del sistema. Puesto que el modo MC es operado con estaciones base sincronizadas, un solo código es usado, que a su vez lo manejan las estaciones usando diferente fase. El número de fases disponible es de 512.

#### **D.4 Transmisión de datos de usuario**

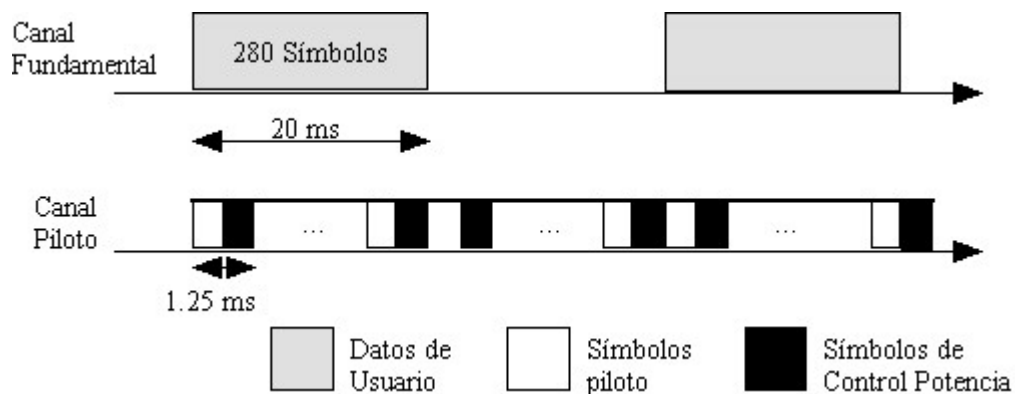
- **Transmisión de datos de subida**

El canal fundamental tiene una máxima rata de datos de 14.4 kbps. Puede cambiar momentáneamente la velocidad con cambios en la repetición, pero la rata de símbolos no es cambiada. Esto permite el uso de detección de rata en la estación base. La estructura del canal fundamental y del canal piloto se muestra en la figura D.2, donde el canal piloto también contiene símbolos de control de potencia con 1.25 ms de intervalo. Esto permite un rápido control de potencia de bajada a una rata de 800 Hz.

Como la rata de datos se incrementa, largas ratas de datos no son introducidas en el mismo canal, por esto se utiliza el canal suplemental. Este es un canal separado que usa códigos paralelos con diferentes funciones de Walsh que el canal fundamental. El enlace de subida puede contener uno o dos canales suplementales con rangos de ratas de datos de unos pocos kbps

hasta 1 Mbps, dependiendo de la configuración del radio. Una típica configuración define 10 o menos ratas de datos para un canal supplemental. Ratas por encima de 14.4 kbps usan codificación turbo.

**Figura D.2 Estructura del canal fundamental en el enlace de subida**



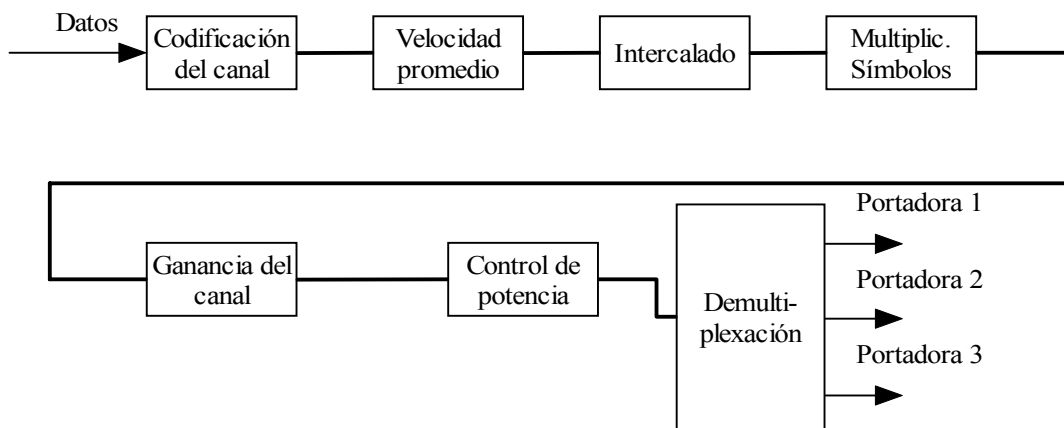
De esta manera los parámetros para el canal fundamental son fijados y luego uno o más canales suplementales pueden ser agregados (con un factor de ensanche fijo para una tasa de datos dada). El tamaño de la carga está definido por el rango de mejora del canal que va de 172 to 744 bits de información. Hay tres opciones para la longitud de la trama de radio: 5, 10 o 20 ms. La transmisión de datos sobre el canal fundamental o supplemental siempre es de 20 ms.

- **Transmisión de datos de Bajada**

En la dirección de bajada, los datos de usuario son divididos entre tres subportadoras paralelas CDMA, cada una con una velocidad de 1.2288 Mcps. Como en el enlace de subida, las tasas de datos más bajas son implementadas en el canal fundamental y las tasas más altas en el canal supplemental.

La tasa de símbolos para el canal de tráfico después de codificado e intercalado el canal es multiplicada por un factor de tres. El control de potencia de símbolo es luego insertado con puncturing y los datos son demultiplexados a tres diferentes sub-portadoras. Las funciones de Walsh son asignadas para la portadora de datos de usuario del canal fundamental con un factor de ensanche típico de 256 o 128 para bajas tasas de datos. Para altas tasas de datos, se usan pequeños factores de ensanchamiento.

**Figura D.3 Multiplexación de datos de usuario a las sub-portadoras**



Mientras que el enlace de subida tiene información de control de potencia multiplexado con el canal piloto, el enlace de bajada tiene solo un piloto común y la información del control de potencia es multiplexada con el flujo de datos por puncturing con una tasa de 800 Hz. Los símbolos de control de potencia son transmitidos a un nivel de potencia constante, como se indica en la figura D.3, y sirve como la única referencia de potencia para la operación de su control. Los símbolos de datos tienen un nivel de potencia variable, ya que el emparejamiento de la velocidad se hace por repetición o puncturing, manteniendo así constante la tasa de símbolo del canal.

- **Canal de codificación para datos de usuario**

Desde la perspectiva del canal de codificación, el canal fundamental siempre usa codificación convolucional, mientras que el canal suplemental utiliza codificación turbo. Las tasas de codificación turbo son de 1/4 y 1/2 mientras que para la codificación convolucional son de 1/4 y 1/6.

## **D.5 Señalización**

Es necesario saber que todos los canales de señalización son definidos como canales propios y la tasa de transmisión es fija.

- **Canal Piloto**

El modo MC tiene un canal piloto común separado para cada portadora. Este canal piloto utiliza funciones tales como estimación de canal y medidas para handover o selección y reelección de celda. Como cada una de las tres portadoras tiene su canal piloto propio, pueden transmitir de antenas separadas si lo desean. Siempre se utilizan canales pilotos específicos llamados canales pilotos auxiliares. Cuando hay un símbolo no conocido, éstos se envían sobre el canal dedicado para establecer la fase de referencia. Para guardar espacio de código, los pilotos auxiliares pueden ser generados por funciones de Walsh con longitud extendida, La máxima longitud de dichas funciones de Walsh es de 512.

- **Canal de Sincronización**

Ayuda a los terminales a adquirir tiempo de sincronización inicial. El canal sincrónico es un canal de baja velocidad con tres tramas de 80 ms de periodo. La tasa de símbolo es de 1.2 kbps.

- **Canal de Transmisión**

La información típica se envía sobre el canal de transmisión siempre que esté disponible el canal de acceso para propósitos de acceso aleatorio. El canal de transmisión tiene una velocidad fija de 19.2 ksps. El método de codificación es 1/3 de rata de codificación convolucional.

- **Canal de Búsqueda rápida.**

Indica a la estación móvil si se espera información de búsqueda o información en el canal de control común. Está dividido en ventanas y subdividido en indicadores de búsqueda que muestran cambios en la configuración.

- **Canal de control de potencia común**

Suministra información del control de potencia para un número de canales de subida que no tienen un canal fundamental que les provea esta información. Los canales que controlan la potencia en el enlace de subida son el canal de control común y el canal de acceso mejorado. El canal de control de potencia común provee tres diferentes grupos de control con ratas de comando de 200, 400 o 800 Hz. Las ramas I y Q otorgan un flujo de 9.6 kbps para el control de potencia.

- **Canales de control común y dedicado**

Este concepto se aplica tanto para el enlace de subida como para el de bajada. Estos canales son designados para llevar información de control a las capas altas por uno o más terminales. Cuando el canal de tráfico no es usado, uno o varios móviles envían información de control a la estación base. El canal común asistente lleva en el enlace de bajada los recursos asignados para el número de terminales.

- **Canal de Acceso Aleatorio (RACH) Para transmisión de señalización**

Varias tramas de canales de acceso pueden ser transmitidas manejando el procedimiento de acceso con control de potencia de lazo cerrado. Como el canal de acceso, el canal de acceso mejorado puede llevar información de señalización para el acceso aleatorio.

## **D.6 Procedimientos de la capa física**

- **Procedimiento de control de Potencia**

El rápido control de potencia de lazo cerrado es implementado tanto en el enlace de subida como en el de bajada. La tasa del comando de control de potencia es de 800 Hz. Además existe el control de potencia de lazo abierto que está diseñado para operar sobre el canal de control mismo en el enlace de subida. Pero este tipo de control es incierto, puesto que los terminales operan a diferentes bandas de frecuencia y no pueden medir con precisión el nivel de potencia absoluta (el control de potencia de lazo abierto necesita comparar la potencia de transmisión del terminal con la potencia de recepción en el enlace de bajada). Los símbolos piloto no existen sobre el canal

dedicado. Pero existen los símbolos de control de potencia que ayudan a que el nivel de potencia no cambie con respecto a cambios en la tasa de datos.

- **Procedimiento de Búsqueda de celda**

Los terminales comienzan buscando la frecuencia del receptor apropiado, la búsqueda continua hasta que una o más fases sean detectadas. Como todas las celdas están sincronizadas, solamente una secuencia es necesitada en el sistema y el terminal busca las diferentes fases de esa única secuencia. La búsqueda de celdas difiere dependiendo si es inicial o es para propósitos de handover. El terminal conseguirá la lista de las celdas vecinas y desarrollará la búsqueda basado en la información del PN-offset del punto de celda.

- **Procedimiento de acceso aleatorio**

El proceso de acceso aleatorio se hace sobre el canal de acceso mejorado, aunque hay varias opciones diferentes para la operación del acceso aleatorio. Cuando el terminal es permitido para enviar el actual mensaje, este puede tener 5 ms de encabezamiento de canal mejorado antes del canal de datos mejorado, el cual opera con 5, 10 o 20 ms de longitud de trama.

- **Procedimiento de medidas de Handover**

Provee medidas para terminales multimodo en el proceso de handover a otro sistema, tal como en IS-95. Por otro lado, el grado de dificultad dependerá de si se esté trabajando con solo voz o con servicios de datos avanzados.