

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

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

**“ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL PARA  
SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES DE  
TERCERA GENERACIÓN – UMTS”**

**HENRY RAMIRO CARVAJAL MORA**

**Sangolquí – Ecuador  
2009**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado “ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN - UMTS” ha sido desarrollado en su totalidad por el Señor HENRY RAMIRO CARVAJAL MORA con cédula de identidad 172132786-2, bajo nuestra dirección.

---

Ing. Gonzalo Olmedo, Ph.D

**DIRECTOR**

---

Ing. Rubén León, MSc

**CODIRECTOR**

## RESUMEN

El presente proyecto de grado titulado “ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN - UMTS”, tiene como objetivo establecer características técnicas para los sistemas móviles de tercera generación UMTS y en función de estas determinar parámetros de dimensionamiento tales como la capacidad del sistema en función del *throughput*, el número de usuarios por célula y el tráfico dentro de la misma para servicios en tiempo real con el fin de evaluar los requerimientos espectrales (ancho de banda) necesarios para proveer servicios de calidad con tasas de transmisión aceptables para los usuarios que emplean este tipo de tecnología. Los parámetros mencionados se analizarán adicionalmente para la tecnología HSPA que constituye la evolución de los sistemas UMTS, esto debido a su implementación en las redes móviles actuales del Ecuador.

El cálculo de la eficiencia espectral se basará en el empleo de las ecuaciones de carga para la interfaz de radio de UMTS (WCDMA), dichas ecuaciones permitirán establecer el número de usuarios por célula en base a parámetros como interferencia, energía recibida y velocidades de transmisión por cada usuario.

Los resultados obtenidos se aplicarán en un caso de estudio, y en conjunto con estadísticas sobre el incremento del número de usuarios que emplean la tecnología UMTS en el Ecuador, se podrá evaluar si las redes actuales pueden dar servicios con tasas de transmisión adecuadas a sus suscriptores.

## **DEDICATORIA**

*A mis padres Jorge y Nancy de quienes he heredado el tesoro más valiosos que pueda dársele a un hijo, el amor. A ellos quien sin escatimar esfuerzo alguno han sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme. Nunca podré pagar toda su dedicación y entrega ni con las riquezas más grandes del mundo. Este logro es para ustedes pues sé que la ilusión de su existencia es y será vernos convertidos a mis hermanos y a mí en personas de provecho.*

*Henry Carvajal Mora*

## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios padre todopoderoso, por ser la fuerzas en todo momento de mi vida y por guiarme con su infinito amor para lograr cada día ser una mejor persona, un buen hijo y un gran hermano.*

*A mis maravillosos padres, quienes con amor, abnegación, sacrificio y ejemplo me ayudan y apoyan cuando me equivoco, me aconsejan cuando dudo y cuando los necesito siempre están a mi lado.*

*A mis dos grandiosos hermanos Jorge y Daniel, quienes con su cariño y compañía dan sentido y alegría a cada instante de mi vida.*

*A mi querida Nathaly, quien con afecto y ternura me ha brindado su apoyo incondicional en todo momento y en todo lugar.*

*A la Escuela Politécnica del Ejército, por ser un noble establecimiento de enseñanza, que me ha preparado para ascender con paso firme y recto hacia el triunfo profesional.*

*A mi director de tesis PhD. Gonzalo Olmedo y a mi codirector MSc. Ing. Rubén León, por su invaluable apoyo y solidaridad, y a quienes debo horas de amable dedicación, pues sin su acertada guía no hubiese podido llegar a la culminación del presente documento.*

*A todas las personas que de una u otra forma me han colaborado y han contribuido durante el proceso de investigación.*

## PRÓLOGO

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos se han convertido en el segmento de más rápido y mayor crecimiento dentro de las diferentes áreas de las telecomunicaciones. Se debe destacar además los beneficios de los sistemas inalámbricos desarrollados, mismos que posibilitan servicios múltiples que van desde una simple conversación telefónica hacia la transferencia de archivos o videoconferencias sin restricciones de lugar ni tiempo.

Hasta la actualidad se ha desarrollado e implementado la tercera generación de sistemas de comunicaciones móviles, entre ellos UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) y su evolución HSPA denominada como tercera generación y media. La primera y segunda generación tuvieron como objetivo primordial dar soporte de comunicaciones de voz aunque pueden emplearse para la transmisión de datos a baja velocidad y por tanto no satisfacen los requerimientos de transmisión de grandes volúmenes de información a altas velocidades entre dispositivos terminales.

Los sistemas de tercera generación y su evolución la tercera generación y media, abren las puertas para el acceso a servicios de Internet específicamente diseñados para uso de equipos móviles y además la aparición de aplicaciones multimedia. Por consiguiente, la convergencia intrínseca hacia los sistemas de tercera generación que ha caracterizado a las dos principales tendencias tecnológicas (Internet y comunicaciones móviles) hace que sean de gran importancia los estudios técnicos, sociales y económicos sobre esta tecnología.

Con la aparición de la tecnologías 3G y 3.5G surgen nuevos servicios donde la convergencia con Internet y el incremento de aplicaciones multimedia generan un aumento significativo de tráfico, las operadoras de telefonía móvil buscan incrementar la capacidad de los sistemas respecto a las redes móviles actuales y esto se refleja en peticiones de incremento de ancho de banda al ente regulador de las telecomunicaciones nacionales (Ministerio de Telecomunicaciones).

El presente estudio pretende constituirse en un referente para el dimensionamiento de redes de tercera generación (UMTS/HSPA) basándose en consideraciones del tráfico y capacidad de la red, del *throughput* y demás parámetros que permitan dar una eficiente utilización de los recursos espectrales buscando siempre brindar una alta calidad de servicio para los usuarios.

Se procura además determinar los requerimientos de espectro radioeléctrico por parte las redes de las operadoras de telefonía móvil en el Ecuador, para la explotación de servicios móviles de tercera generación, considerando la demanda de los mismos y el tráfico que ellos generan en la red.

El contenido del proyecto de grado se encuentra estructurado de la siguiente manera:

El Capítulo 1 da conocer aspectos generales de los sistemas de comunicaciones móviles. En primer lugar se describen las diferentes técnicas de acceso múltiple, a continuación se analiza la evolución de la telefonía móvil hasta los sistemas de tercera generación, finalmente se especifican las características de la interfaz de radio de UMTS (WCMDA) y la arquitectura de dicho sistema.

En el Capítulo 2 se obtendrán y analizarán parámetros técnicos necesarios para el cálculo de la eficiencia espectral de los sistemas móviles UMTS tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente, teniendo en cuenta las especificaciones técnicas de la 3GPP.

En el Capítulo 3 se analiza la eficiencia espectral y además se proponen mecanismos para mejorar el *performance* de WCDMA. Posteriormente se determinará el *throughput* que se puede manejar en una célula, además se evaluarán las pérdidas que se producen en la interfaz aérea con lo que se pretende dar una medida que permita evaluar la cobertura de la célula. Finalmente se determinará el tráfico que se maneja en una célula UMTS utilizando herramientas estadísticas como el modelo Erlang B para servicios en tiempo real.

En el Capítulo 4 se considerará un caso de estudio para evaluar una zona de la red de un Operador de Servicio Móvil Avanzado (SMA). En este capítulo se considerarán dos

casos particulares. En el primer caso se tendrá en cuenta la situación actual de los operadores dentro del Ecuador, es decir, se evaluará la capacidad de la red teniendo en cuenta parámetros como las tasas de transmisión máximas ofertadas, los equipos terminales utilizados y efectos sobre la red UMTS debido a la coexistencia con la tecnología GSM. Dentro del segundo caso de estudio se determinará la capacidad del sistema con miras al futuro, es decir, considerando que todo el ancho de banda disponible por el operador será utilizado para los servicios de tercera generación.

En el Capítulo 5 se analiza el funcionamiento de la tecnología HSPA tanto para el *downlink* (HSDPA) como para el *uplink* (HSUPA) y la manera de determinar el *throughput* y cobertura para una célula con esta tecnología. Además se emplean los resultados e información obtenida para elaborar un caso de estudio para un operador de prueba en el Ecuador.

El Capítulo 6 recoge las conclusiones y recomendaciones obtenidas del presente estudio.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

## CAPÍTULO 1

### ASPECTOS GENERALES

<b>1.1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Técnicas de Acceso Múltiple</b>	<b>2</b>
1.2.1 Acceso Múltiple por División de Frecuencias (FDMA)	2
1.2.2 Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA)	3
1.2.3 Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA)	4
1.2.4 Acceso Múltiple por División de Espacio (SDMA)	4
1.2.5 Acceso Múltiple por División de Código (CDMA)	5
<b>1.3 Sistemas Dúplex</b>	<b>11</b>
<b>1.4 Evolución de los sistemas de comunicación móviles</b>	<b>12</b>
1.4.1 Primera Generación (1G)	12
1.4.2 Segunda Generación (2G)	13
1.4.3 Segunda Generación y media (2.5G)	17
1.4.4 Tercera Generación (3G)	19
<b>1.5 Interfaz radioeléctrica WCDMA</b>	<b>24</b>
1.5.1 Factor de esparcimiento	25
1.5.2 Modulación	26
1.5.3 Codificación	26
1.5.4 Tipos de Códigos utilizados por WCDMA	26
1.5.5 Control de Potencia	27
1.5.6 Handover	28
1.5.7 Reuso de frecuencias	31
<b>1.6 Sistemas móviles UMTS</b>	<b>33</b>
1.6.1 Características de UMTS	33
1.6.2 Arquitectura de la Red UMTS	34

**CAPÍTULO 2**  
**PARÁMETROS PREVIOS A LA OBTENCIÓN DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL**  
**DE UNA RED UMTS**

<b>2.1 Introducción</b>	<b>41</b>
<b>2.2 Codificación de Canal</b>	<b>42</b>
2.2.1 Códigos Convolucionales	42
2.2.2 Turbo Códigos	43
2.2.3 <i>Punctured codes</i> (Códigos perforados)	44
2.2.4 Tasas de Código en WCDMA-FDD	44
<b>2.3 Ganancia de procesamiento</b>	<b>47</b>
<b>2.4 BLER (<i>Block Error Ratio</i>)</b>	<b>47</b>
<b>2.5 Factor de ortogonalidad (<math>\alpha</math>)</b>	<b>48</b>
<b>2.6 Relación señal a ruido <math>E_b/N_0</math></b>	<b>48</b>
2.6.1 Requerimientos de desempeño para el enlace ascendente	49
2.6.2 Requerimientos de desempeño para el enlace descendente	53

**CAPÍTULO 3**  
**ANÁLISIS DE EFICIENCIA ESPECTRAL PARA UN SISTEMA UMTS**

<b>3.1 Introducción</b>	<b>58</b>
<b>3.2 Eficiencia Espectral de WCDMA</b>	<b>59</b>
3.2.1 Factor de Carga	59
3.2.2 Cálculo de canales simultáneos en una célula	64
<b>3.3 <i>Throughput</i> en WCDMA</b>	<b>70</b>
<b>3.4 Capacidad de una célula en función de los códigos ortogonales</b>	<b>74</b>
<b>3.5 Potencia de transmisión para un Nodo B</b>	<b>77</b>
3.5.1 Potencia de transmisión en equipos comerciales	79
3.5.2 <i>Throughput</i> de una célula en función de la potencia del Nodo B	81

<b>3.6 Mecanismos para incrementar la capacidad de un sistema UMTS</b>	<b>91</b>
3.6.1 Incrementar los amplificadores de potencia	91
3.6.2 Emplear varias frecuencias portadoras	91
3.6.3 Empleo de diversidad en la transmisión	92
<b>3.7 Tráfico de una célula UMTS</b>	<b>94</b>
3.7.1 Introducción a las teorías de tráfico	94
3.7.2 Modelo Erlang B	94
3.7.3 Análisis de tráfico para una célula	95

## CAPÍTULO 4

### CASO DE ESTUDIO – OPERADOR DE SERVICIO MÓVIL AVANZADO

<b>4.1 Introducción</b>	<b>98</b>
<b>4.2 Parámetros considerados para el Operador de Servicio Móvil Avanzado</b>	<b>99</b>
4.2.1 Distribución del Espectro Radioeléctrico disponible	99
4.2.2 Equipos utilizados	100
<b>4.3 Interferencia debido a la coexistencia con otras tecnologías</b>	<b>104</b>
4.3.1 Escenario 1: GSM– UMTS en operación no coordinada	105
4.3.2 Escenario 2: GSM – UMTS en operación coordinada	107
4.3.3 Escenario 3: Interferencia debido a la coexistencia con otras redes UMTS – Operación no coordinada	108
4.3.4 Mecanismo para evitar la interferencia de otros operadores UMTS y disminuir la interferencia proveniente de GSM	111
<b>4.4 Caso de estudio</b>	<b>111</b>
4.4.1 Escenario considerado para el análisis	111
4.4.2 Análisis considerando la situación actual del operador	114
4.4.3 Análisis a futuro	118
<b>4.5 Análisis de tráfico y proyecciones a futuro</b>	<b>122</b>

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS DE EFICIENCIA ESPECTRAL PARA LA TECNOLOGÍA HSPA

<b>5.1 Introducción</b>	<b>126</b>
<b>5.2 Análisis para el <i>downlink</i> - HSDPA</b>	<b>127</b>
5.2.1 Aspectos básicos de HSDPA	127
5.2.2 Factores de desempeño para HSDPA	129
5.2.3 <i>Throughput</i> en HSDPA	130
5.2.4 Eficiencia Espectral de HSDPA	134
<b>5.3 Análisis para el <i>uplink</i> - HSUPA</b>	<b>135</b>
5.3.1 Aspectos básicos de HSUPA	135
5.3.2 Factores de desempeño para HSUPA	136
5.3.3 <i>Throughput</i> en HSUPA	136
5.3.4 Eficiencia espectral para HSUPA	138
<b>5.4 Caso de estudio</b>	<b>139</b>
5.4.1 Consideraciones para el caso de estudio	139
5.4.2 Análisis para el <i>downlink</i>	139
5.4.3 Análisis para el <i>uplink</i>	144
5.4.4 Cobertura de cada sector	147
5.4.5 Proyecciones a futuro	148

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

<b>6.1 Conclusiones</b>	<b>149</b>
<b>6.2 Recomendaciones</b>	<b>152</b>
<b>ANEXO A1 – Modelo de Propagación COST 231 – HATA</b>	<b>154</b>
<b>ANEXO A2 – Hoja Técnica Estación Base Huawei DBS 3800</b>	<b>157</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1

<b>Figura 1.1.</b> Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA) _____	3
<b>Figura 1.2.</b> Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA) _____	4
<b>Figura 1.3.</b> Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA) _____	4
<b>Figura 1.4.</b> Acceso Múltiple por División de Espacio (SDMA) _____	5
<b>Figura 1.5.</b> Acceso Múltiple por División de Código (CDMA) _____	6
<b>Figura 1.6.</b> Técnica de Espectro Esparcido _____	8
<b>Figura 1.7.</b> Principio de Espectro Esparcido por Saltos de Frecuencia _____	9
<b>Figura 1.8.</b> Principio de Espectro Esparcido por Saltos de Tiempo _____	9
<b>Figura 1.9.</b> Principio de Espectro Esparcido por Secuencia Directa _____	10
<b>Figura 1.10.</b> Generaciones Celulares _____	12
<b>Figura 1.11.</b> Evolución de la telefonía móvil celular _____	19
<b>Figura 1.12.</b> Bandas de Frecuencias para IMT-2000 _____	22
<b>Figura 1.13.</b> Interfaces radioeléctricas del IMT-2000 _____	23
<b>Figura 1.14.</b> Portadora de WCDMA y sus dimensiones _____	24
<b>Figura 1.15.</b> Fenómeno de cell breathing _____	28
<b>Figura 1.16.</b> Proceso de Handover _____	28
<b>Figura 1.17.</b> Proceso de Hard Handover _____	29
<b>Figura 1.18.</b> Proceso de Softer Handover _____	30
<b>Figura 1.19.</b> Proceso de Soft Handover _____	30
<b>Figura 1.20.</b> Reuso de frecuencias _____	31
<b>Figura 1.21.</b> Arquitectura de la red UMTS _____	35
<b>Figura 1.22.</b> Equipos móviles UMTS _____	35
<b>Figura 1.23.</b> USIM _____	36

## CAPÍTULO 2

<b>Figura 2.1.</b> Ejemplo de un codificador convolucional de tasa $1/2$	43
<b>Figura 2.2.</b> Codificador convolucional de tasa $r = 1/3$	45
<b>Figura 2.3.</b> Turbo codificador de tasa $r = 1/3$	45
<b>Figura 2.4.</b> Interferencia producida por estaciones base de otras células	56

## CAPÍTULO 3

<b>Figura 3.1.</b> Máximo número de canales simultáneos para diferentes tasas de transmisión bajo un ambiente de Macro células	66
<b>Figura 3.2.</b> Número de canales simultáneos en función del factor de carga	66
<b>Figura 3.3.</b> Número de canales simultáneos en función del factor de carga	67
<b>Figura 3.4.</b> Máximo número de canales simultáneos para diferentes tasas de transmisión bajo un ambiente de Micro células	69
<b>Figura 3.5.</b> Número de canales simultáneos en función del factor de carga <i>Downlink</i>	69
<b>Figura 3.6.</b> Número de canales simultáneos en función del factor de carga	70
<b>Figura 3.7.</b> <i>Throughput</i> en una macro célula WCDMA para diferentes tasas de transmisión	72
<b>Figura 3.8.</b> <i>Throughput</i> en una micro célula WCDMA para diferentes tasas de transmisión	72
<b>Figura 3.9.</b> Capacidad de una célula con usuarios con tasas de 384 kbps en diferentes casos	73
<b>Figura 3.10.</b> Límite superior de canales simultáneos de una célula en el <i>downlink</i> debido a los códigos ortogonales utilizados	75
<b>Figura 3.11.</b> Límite superior de la capacidad de una célula en el <i>downlink</i> debido a los códigos ortogonales utilizados	76
<b>Figura 3.12.</b> Máximas pérdidas y mínimas pérdidas en una macro célula	77
<b>Figura 3.13.</b> Máximas pérdidas en el <i>downlink</i> en función de la capacidad de la célula	83
<b>Figura 3.14.</b> Margen de interferencia en el <i>uplink</i> en función del <i>throughput</i>	85
<b>Figura 3.15.</b> Máximas pérdidas en el <i>uplink</i> en función de la capacidad de la célula	87
<b>Figura 3.16.</b> Gráfica comparativa entre las máximas pérdidas en el <i>uplink</i> y <i>downlink</i> en función de la capacidad de la célula	87

<b>Figura 3.17.</b> Efectos de la potencia de transmisión sobre la capacidad de la célula _____	88
<b>Figura 3.18.</b> Cambios en la cobertura y capacidad de la célula debido a la potencia de transmisión utilizada en el Nodo B para usuarios con tasas de 64 kbps _____	89
<b>Figura 3.19.</b> Cambios en la cobertura y capacidad de la célula debido a la potencia de transmisión utilizada en el Nodo B para usuarios con servicios de voz _____	90
<b>Figura 3.20.</b> Efectos de la diversidad en la transmisión _____	92
<b>Figura 3.21.</b> Diversidad en la transmisión con <i>feedback</i> _____	93
<b>Figura 3.22.</b> Efectos de los mecanismos para incrementar la capacidad de una célula UMTS _____	93
<b>Figura 3.23.</b> Número de usuarios con un tráfico de 15 mili Erlangs soportados en una célula _____	97

## CAPÍTULO 4

<b>Figura 4.1.</b> Bandas de frecuencia concesionadas para los Operadores de Servicio Móvil Avanzado _____	99
<b>Figura 4.2.</b> Distribución del espectro radioeléctrico disponible para las tecnologías 2G y 3G _____	100
<b>Figura 4.3.</b> Estación base tradicional _____	101
<b>Figura 4.4.</b> Estación base distribuida _____	101
<b>Figura 4.5.</b> BBU- 3806 (Unidad Banda Base) _____	102
<b>Figura 4.6.</b> RRU-3801C (Unidad de potencia y radio frecuencia) _____	102
<b>Figura 4.7.</b> Separación entre la frecuencia central de UMTS y GSM en bandas adyacentes _____	105
<b>Figura 4.8.</b> Pérdidas en la capacidad de una célula UMTS en el <i>downlink</i> debido a la interferencia proveniente de GSM (Operación no coordinada) _____	106
<b>Figura 4.9.</b> Pérdidas en la capacidad de una célula UMTS en el <i>uplink</i> debido a la interferencia proveniente de GSM (Operación no coordinada) _____	106
<b>Figura 4.10.</b> Pérdidas en la capacidad de una célula UMTS en el <i>downlink</i> debido a la interferencia proveniente de GSM (Operación coordinada) _____	107
<b>Figura 4.11.</b> Pérdidas en la capacidad de una célula UMTS en el <i>uplink</i> debido a la interferencia proveniente de GSM (Operación coordinada) _____	108
<b>Figura 4.12.</b> Separación de frecuencias centrales entre portadoras UMTS _____	109

<b>Figura 4.13.</b> Pérdidas en la capacidad de una célula UMTS en el <i>downlink</i> debido a la interferencia proveniente de otro operador UMTS (Macro células) _____	109
<b>Figura 4.14.</b> Pérdidas en la capacidad de una célula UMTS en el <i>uplink</i> debido a la interferencia proveniente de otro operador UMTS (Macro células) _____	110
<b>Figura 4.15.</b> Distribución de frecuencias tipo <i>sándwich</i> _____	111
<b>Figura 4.16.</b> Escenario considerado para el caso de estudio (Imagen de Google Earth) _____	112
<b>Figura 4.17.</b> Distribución de frecuencias utilizando tres portadoras para la tecnología UMTS _____	119
<b>Figura 4.18.</b> Incremento de usuarios UMTS en el Ecuador _____	124

## CAPITULO 5

<b>Figura 5.1.</b> Principio de programación del nodo B _____	128
<b>Figura 5.2.</b> Técnica de retransmisión en la capa física _____	128
<b>Figura 5.3.</b> <i>Throughput</i> promedio en el <i>downlink</i> en función del $\gamma_b$ promedio y el número de códigos HS-DSCH empleados _____	130
<b>Figura 5.4.</b> <i>Throughput</i> en el <i>downlink</i> en función de las pérdidas en el enlace para diferentes potencias asignadas al canal HS-DSCH. No se considera interferencia de otras células (5 códigos) _____	131
<b>Figura 5.5.</b> <i>Throughput</i> para un usuario con tecnología HSDPA en función de la potencia asignada al canal HS-DSCH empleando 5 códigos HS-PDSCH _____	133
<b>Figura 5.6.</b> Capacidad de una célula en el <i>downlink</i> para un usuario en función de la potencia asignada al canal HS-DSCH y el número de códigos HS-DSCH utilizados _____	133
<b>Figura 5.7.</b> $\gamma_b$ requerido en función de la tasa de transmisión de un usuario HSUPA _____	136
<b>Figura 5.8.</b> Máximas pérdidas en función de la tasa de transmisión para HSUPA _____	138
<b>Figura 5.9.</b> Códigos HS-DSCH empleados en HSDPA para terminales categoría 1 _____	142

# ÍNDICE DE TABLAS

## CAPÍTULO 1

<b>Tabla 1.1.</b> Comparación de Técnicas de Acceso Múltiple	6
<b>Tabla 1.2.</b> Sistemas de Telefonía Celular Analógica	13
<b>Tabla 1.3.</b> Bandas de frecuencias para GSM	16
<b>Tabla 1.4.</b> Asignación de espectro para IMT-2000	22
<b>Tabla 1.5.</b> Bandas de frecuencias para WCDMA según 3GPP	25
<b>Tabla 1.6.</b> Tipos de Códigos para WCDMA	26

## CAPITULO 2

<b>Tabla 2.1.</b> Codificación de canal y tasa de código para WCDMA	45
<b>Tabla 2.2.</b> Ganancias de procesamiento para diferentes tasas de transmisión	47
<b>Tabla 2.3.</b> Valores de BLER requerido para el enlace ascendente	50
<b>Tabla 2.4.</b> Valores de $\gamma b$ requeridos para propagación estática en el <i>uplink</i>	51
<b>Tabla 2.5.</b> Valores de $\gamma b$ requeridos para propagación estática en el <i>uplink</i> sin sobrecarga del canal DCCH	52
<b>Tabla 2.6.</b> Valores de $\gamma b$ requeridos para propagación multitrayectoria en el <i>uplink</i>	52
<b>Tabla 2.7.</b> Parámetros de requerimiento de desempeño para propagación estática en el <i>downlink</i>	54
<b>Tabla 2.8.</b> Parámetros de requerimiento de desempeño para propagación multitrayectoria en el <i>downlink</i>	54
<b>Tabla 2.9.</b> Valores de $\gamma b$ para el <i>downlink</i> en propagación estática	55
<b>Tabla 2.10.</b> Valores de $\gamma b$ para el <i>downlink</i> en propagación multitrayectoria	55

### CAPITULO 3

<b>Tabla 3.1.</b> Parámetros empleados en el cálculo del factor de carga ( <i>uplink</i> )	62
<b>Tabla 3.2.</b> Parámetros empleados en el cálculo del factor de carga ( <i>downlink</i> )	63
<b>Tabla 3.3.</b> Número de usuarios (Macro células - <i>Downlink</i> – Propagación Estática)	64
<b>Tabla 3.4.</b> Número de usuarios (Macro Células - <i>Downlink</i> – Propagación Multitrayectoria)	65
<b>Tabla 3.5.</b> Número de usuarios (Macro células - <i>Uplink</i> - Propagación Estática)	65
<b>Tabla 3.6.</b> Número de usuarios (Macro células - <i>Uplink</i> - Propagación Multitrayectoria)	65
<b>Tabla 3.7.</b> Número de usuarios (Micro células - <i>Downlink</i> - Propagación Estática)	67
<b>Tabla 3.8.</b> Número de usuarios (Micro células - <i>Downlink</i> - Propagación Multitrayectoria)	68
<b>Tabla 3.9.</b> Número de usuarios (Micro células - <i>Uplink</i> - Propagación Estática)	68
<b>Tabla 3.10.</b> Número de usuarios (Micro células - <i>Uplink</i> - Propagación Multitrayectoria)	68
<b>Tabla 3.11.</b> <i>Throughput</i> para 12.2 kbps ( <i>Downlink</i> )	71
<b>Tabla 3.12.</b> <i>Throughput</i> para 12.2 kbps ( <i>Uplink</i> )	71
<b>Tabla 3.13.</b> <i>Throughput</i> para 64 kbps ( <i>Downlink</i> )	71
<b>Tabla 3.14.</b> <i>Throughput</i> para 64 kbps ( <i>Uplink</i> )	71
<b>Tabla 3.15.</b> Parámetros que alteran la capacidad de la célula en el <i>downlink</i>	73
<b>Tabla 3.16.</b> Parámetros considerados para cálculo de la capacidad en función del número de códigos ortogonales	74
<b>Tabla 3.17.</b> Potencias típicas para los Canales Físicos empleados en el <i>downlink</i>	79
<b>Tabla 3.18.</b> Características técnicas Nodo B Fujitsu – Alcatel	80
<b>Tabla 3.19.</b> Características técnicas Nodo B Lucent	80
<b>Tabla 3.20.</b> Características técnicas Nodo B Motorola	80
<b>Tabla 3.21.</b> Características técnicas Nodo B Motorola	80
<b>Tabla 3.22.</b> Parámetros considerados para ejemplo de cálculos de pérdidas en la trayectoria para el <i>downlink</i>	82
<b>Tabla 3.23.</b> Consideraciones para ejemplo de cálculos de pérdidas en la trayectoria	82
<b>Tabla 3.24.</b> Resultados obtenidos para pérdidas máximas de la trayectoria en función del <i>throughput</i> para el <i>downlink</i>	83
<b>Tabla 3.25.</b> Clasificación de los UE según la 3GPP	84
<b>Tabla 3.26.</b> Parámetros considerados para ejemplo de cálculos de pérdidas en la trayectoria para el <i>uplink</i>	86

<b>Tabla 3.27.</b> Resultados obtenidos para pérdidas máximas de la trayectoria en función del <i>throughput</i> y el margen de interferencia para el <i>uplink</i> _____	86
<b>Tabla 3.28.</b> Ganancia por diversidad en la transmisión _____	92
<b>Tabla 3.29.</b> Parámetros considerados para el cálculo del tráfico en una célula ( <i>uplink</i> )__	95
<b>Tabla 3.30.</b> Cálculos de tráfico y número de usuarios en el <i>uplink</i> (Propagación estática)	96
<b>Tabla 3.31.</b> Cálculos de tráfico y número de usuarios en el <i>uplink</i> (Propagación multitrayectoria) _____	96
<b>Tabla 3.32.</b> Parámetros considerados para el cálculo del tráfico en una célula ( <i>downlink</i> )	96
<b>Tabla 3.33.</b> Cálculos de tráfico y número de usuarios en el <i>downlink</i> (Propagación estática) _____	96
<b>Tabla 3. 34.</b> Cálculos de tráfico y número de usuarios en el <i>downlink</i> (Propagación multitrayectoria) _____	97

## CAPÍTULO 4

<b>Tabla 4.1.</b> Especificaciones técnicas equipo Huawei DBS-3800 _____	102
<b>Tabla 4.2.</b> Equipos terminales empleados por el operador de prueba _____	103
<b>Tabla 4.3.</b> ACLR, ACS y ACIR para operación no coordinada entre GSM y UMTS __	106
<b>Tabla 4.4.</b> Pérdida de la capacidad en UMTS debido a la interferencia proveniente de GSM _____	107
<b>Tabla 4.5.</b> Pérdida de la capacidad en UMTS debido a la interferencia proveniente de GSM _____	108
<b>Tabla 4.6.</b> ACLR, ACS y ACIR para operación no coordinada entre redes UMTS __	110
<b>Tabla 4.7.</b> Pérdida de la capacidad UMTS debido a la interferencia proveniente de otra red UMTS _____	110
<b>Tabla 4.8.</b> Ubicación de las estaciones base en la zona de estudio _____	113
<b>Tabla 4.9.</b> Parámetros utilizados para el caso de estudio _____	114
<b>Tabla 4.10.</b> Factor de carga y número de canales para el <i>downlink</i> y el <i>uplink</i> _____	114
<b>Tabla 4.11.</b> Parámetros considerados para cálculo de las máximas pérdidas en el <i>downlink</i> y el <i>uplink</i> _____	115
<b>Tabla 4.12.</b> Capacidad de un sector y máximas pérdidas tolerables para el <i>downlink</i> __	115
<b>Tabla 4.13.</b> Capacidad de un sector y máximas pérdidas tolerables para el <i>uplink</i> _____	116

<b>Tabla 4.14.</b> Capacidad de un sector considerando la interferencia proveniente de redes en bandas adyacentes_____	116
<b>Tabla 4.15.</b> Capacidad total del conjunto de estaciones base analizadas _____	117
<b>Tabla 4.16.</b> Parámetros utilizados para el cálculo del radio de cada sector_____	117
<b>Tabla 4.17.</b> Radio de un sector y área de cobertura con una BTS_____	117
<b>Tabla 4.18.</b> Capacidad de un sector y máximas pérdidas para el <i>downlink</i> y el <i>uplink</i> considerando una portadora UMTS _____	120
<b>Tabla 4.19.</b> Capacidad de un sector utilizando tres portadoras UMTS _____	120
<b>Tabla 4.20.</b> Capacidad total del conjunto de estaciones base analizadas considerando tres portadoras UMTS _____	121
<b>Tabla 4.21.</b> Radio de un sector y área de cobertura de una BTS utilizando tres portadoras UMTS _____	121
<b>Tabla 4.22.</b> Parámetros utilizados para el análisis de tráfico en la red de análisis _____	122
<b>Tabla 4.23.</b> Tráfico en Erlangs y número de usuarios para un sector _____	122
<b>Tabla 4.24.</b> Número de estaciones base por provincia _____	123
<b>Tabla 4.25.</b> Distribución de usuarios UMTS en la provincia de Pichincha_____	124

## CAPITULO 5

<b>Tabla 5.1.</b> Parámetros considerados para el cálculo de las pérdidas en el <i>downlink</i> _____	131
<b>Tabla 5.2.</b> Parámetros para el cálculo de la capacidad de la célula en función de la potencia empleada_____	132
<b>Tabla 5.3.</b> Capacidad de una célula utilizando 18 W para el canal HS-DSCH _____	134
<b>Tabla 5.4.</b> <i>Throughput</i> de una célula empleando técnicas para incrementar su capacidad _____	134
<b>Tabla 5.5.</b> Eficiencia espectral de HSDPA _____	135
<b>Tabla 5.6.</b> Eficiencia espectral de HSDPA empleando sectorización _____	135
<b>Tabla 5.7</b> Parámetros considerados para el cálculo de la capacidad de una célula con tecnología HSUPA _____	137
<b>Tabla 5.8.</b> Máximas pérdidas que tolera una célula en función de la tasa de transmisión promedio_____	137
<b>Tabla 5.9.</b> Consideraciones para el cálculo de $\gamma b$ en el sistema HSDPA _____	140

<b>Tabla 5.10.</b> Número de bits y tasa de transmisión por TTI según el esquema de modulación _____	141
<b>Tabla 5.11.</b> Categorías para equipos terminales HSDPA _____	141
<b>Tabla 5.12.</b> Pérdidas en la capacidad debido a la coexistencia con redes móviles de tecnología 2G ( <i>Downlink</i> ) _____	143
<b>Tabla 5.13.</b> Número de usuarios y capacidad total de la zona de estudio para el <i>downlink</i> _____	143
<b>Tabla 5.14.</b> Capacidad de un sector considerando tres portadoras ( <i>downlink</i> ) _____	144
<b>Tabla 5.15.</b> Número de usuarios y capacidad total de la zona de estudio para el <i>downlink</i> utilizando tres portadoras _____	144
<b>Tabla 5.16.</b> Parámetros utilizados para el cálculo de la capacidad en el <i>uplink</i> con tecnología HSUPA _____	145
<b>Tabla 5.17.</b> Capacidad de la célula y número de usuarios simultáneos en el <i>uplink</i> ____	145
<b>Tabla 5.18.</b> Pérdidas en la capacidad debido a la coexistencia con redes móviles de tecnología 2G ( <i>Uplink</i> ) _____	145
<b>Tabla 5.19.</b> Número de usuarios y capacidad total de la zona de estudio para el <i>uplink</i> _	146
<b>Tabla 5.20.</b> Capacidad de un sector considerando tres portadoras ( <i>uplink</i> ) _____	146
<b>Tabla 5.21.</b> Número de usuarios y capacidad total de la zona de estudio para el <i>uplink</i> utilizando tres portadoras _____	147
<b>Tabla 5.22.</b> Presupuesto de potencia y máximas pérdidas tolerables _____	147
<b>Tabla 5.23.</b> Área de cobertura de un sector y cobertura por un BTS _____	148

## GLOSARIO

1G	Primera Generación de las comunicaciones móviles celulares
2G	Segunda Generación de las comunicaciones móviles celulares
3G	Tercera Generación de las comunicaciones móviles celulares
3.5G	Evolución de los sistemas móviles celulares pertenecientes a la 3G
3GPP	Proyecto de Asociación para la Tercera Generación
ACIR	Relación de Interferencia con Canales Adyacentes
ACLR	Relación de Fugas de potencia en Canales Adyacentes
ACS	Selectividad respecto del Canal Adyacente
AICH	Canal Indicador de Adquisición
AMC	Modulación y Codificación Adaptativa
AMPS	Servicio Telefónico Móvil Avanzado
AMR	Multi tasa adaptable (Códec de voz)
ARQ	Petición de Repetición Automática
AuC	Centro de autenticación
BCH	Canal de <i>Broadcast</i>
BER	Tasa de Error de Bit
BLEP	Probabilidad de Error en Bloques
BLER	Relación de Bloques Erróneos
BPSK	Esquema de Modulación de Fase Binario
BTS	Estación Base
CAMR	Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código
CEPT	Conferencia Europea de Correos y Telecomunicaciones
CN	Núcleo de la Red
CPCH	Canal Común de Paquetes
CPICH	Canal Piloto Común
CRC	Códigos de Redundancia Cíclica
DBS	Estación Base Distribuida

DCCH	Canal de Control Dedicado (Canal Lógico)
DCH	Canal Dedicado
DECT	Telecomunicaciones Inalámbricas Mejoradas Digitalmente
DPCCH	Canal de Control Físico Dedicado
DPDCH	Canal de Datos Físico Dedicado
DS	Secuencia Directa
DSCH	Canal Compartido en el enlace Descendente
DSSS	Espectro Esparcido por Secuencia Directa
DTCH	Canal de Tráfico Dedicado
EDGE	Tasas de Transmisión Mejoradas para la Evolución de GSM
EIR	Registro de identidad de los equipos
FACH	Canal de Acceso Directo
FDD	Duplexión por División de Frecuencia
FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencias
FHSS	Espectro Esparcido por Saltos de Frecuencia
GGSN	<i>Gateway</i> para el nodo de soporte de servicios GPRS
GMSC	<i>Gateway</i> MSC
GPRS	Servicio General de Paquetes vía Radio
GSM	Sistema Global para Comunicaciones Móviles
HARQ	Petición de Repetición Automática Híbrida
HLR	Registro de Localización de Usuarios Locales
HSCSD	Circuito de Switcheo de Datos de Alta Velocidad
HSDPA	Acceso a Paquetes de Alta Velocidad en el enlace Descendente
HS-DPCCH	Canal de Control Dedicado de Alta Velocidad (Enlace Ascendente)
HS-DSCH	Canal Compartido para el enlace Descendente de Alta Velocidad
HSPA	Acceso a Paquetes de Alta Velocidad
HSS	Espectro Esparcido Híbrido
HS-SCCH	Canal de Control de Alta Velocidad
HSUPA	Acceso a Paquetes de Alta Velocidad en el enlace Ascendente
IMT	Telecomunicaciones Móviles Internacionales
IP	Protocolo de Internet
IS	Sistema Provisional
ME	Equipo móvil
MMS	Servicio de Mensajes Multimedia

MSC	Centro de Switcheo Móvil
NF	Figura de ruido
NMTS	Sistema de Telefonía Móvil Nórdico
NTT	Corporación de Telefonía y Telegrafía de Japón
OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales
OVSF	Factor de Ensanchamiento Variable Ortogonal
P-CCPCH	Canal Físico de Control Común Primario
PCS	Servicio de Comunicaciones Personales
PICH	Canal Indicador de Paginación
PN	Pseudo ruido
P-SCH	Canal de Sincronización Primario
PSTN	Red de Telefonía Switcheada Pública
QPSK	Esquema de Modulación de Fase en Cuadratura
RACH	Canal de Acceso Randómico
RF	Radio Frecuencia
RNC	Controlador de la Red de Radio
RNS	Subsistema de la Red de Radio
RRC	Control de los Recursos de Radio
SAP	Punto de Acceso al Servicio
S-CCPCH	Canal Físico de Control Común Secundario
SDMA	Acceso Múltiple por División de Espacio
SF	Factor de ensanchamiento
SGSN	Nodo de soporte de servicios GPRS
SMA	Servicio Móvil Avanzado
SMS	Servicio de Mensajes Cortos
SNR	Relación Señal a Ruido
S-SCH	Canal de Sincronización Secundario
TACS	Sistema de Comunicaciones de Acceso Total
TDD	Duplexión por División de Tiempo
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo
THSS	Espectro Esparcido por Saltos de Tiempo
TTI	Tiempo de un Intervalo de Transmisión
UE	Equipo de usuario
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones

UMTS	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles
USIM	Módulo de Identidad de Suscriptor UMTS
UTRA	Acceso de Radio Terrestre Universal
UTRAN	Red de Acceso de Radio Terrestre UMTS
VLR	Registro de Localización de Usuarios Visitantes
VoIP	Voz sobre IP
WAP	Protocolo de Aplicaciones Inalámbricas
WCDMA	Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha
WWW	Red Global Mundial

# CAPÍTULO 1

## ASPECTOS GENERALES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas, y muy en especial la telefonía móvil celular han capturado la atención y la imaginación de las personas, por tanto se han convertido en el segmento de mayor crecimiento y desarrollo dentro del área de las telecomunicaciones. Los principales ingredientes para esta evolución significativa han sido el deseo de movilidad en la comunicación y la visión de los beneficios que los sistemas inalámbricos pueden brindar, así por ejemplo se puede encontrar servicios múltiples que van desde una simple conversación telefónica hasta la transferencia de archivos e inclusive videoconferencias, todo esto sin restricciones en el área de servicio, la forma, lugar ni instante de tiempo elegido. Con seguridad los sistemas de telefonía móvil constituyen un puntal básico del cambio más brusco, en términos de velocidad de implantación de un nuevo servicio, sufrido por la sociedad humana en toda la historia. Ninguna tecnología hasta el momento ha pasado tan rápidamente de su puesta en marcha inicial a su utilización por millones de personas en todo el planeta.

Las nuevas tendencias globalizadoras de la economía y la apertura a nivel internacional de numerosos países en el mundo, ha propiciado la aparición de una nueva generación de sistemas de comunicaciones móviles, mismo que integre a operadores de diferentes países. Este tipo de comunicaciones, basadas en sistemas móviles de tercera generación permitirán en el futuro dar soporte a abonados para realizar cualquier tipo de comunicación. Estos sistemas se denominan Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Universales (*Universal Mobile Telecommunication System- UMTS*)

Este capítulo da a conocer aspectos generales de los sistemas de comunicaciones móviles. A continuación se describen las diferentes técnicas de acceso múltiple,

posteriormente se analiza la evolución de la telefonía móvil hasta los sistemas de tercera generación, finalmente se especifican las características de la interfaz de radio de UMTS (WCDMA) y la arquitectura de dicho sistema.

## **1.2 TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE**

Uno de los factores más importantes en un sistema de comunicaciones constituye la manera en como se accede al medio de comunicación, de ahí la importancia de emplear técnicas de acceso múltiple. Estas técnicas permiten que varios usuarios puedan establecer una comunicación de forma simultánea.

Una técnica de acceso múltiple define la manera en la que se utiliza el espectro de frecuencias para crear y asignar los canales a los múltiples usuarios

Las siguientes son las principales técnicas de acceso múltiple:

- FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias).
- TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo).
- OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales).
- SDMA (Acceso Múltiple por División de Espacio).
- CDMA (Acceso Múltiple por División de Código).

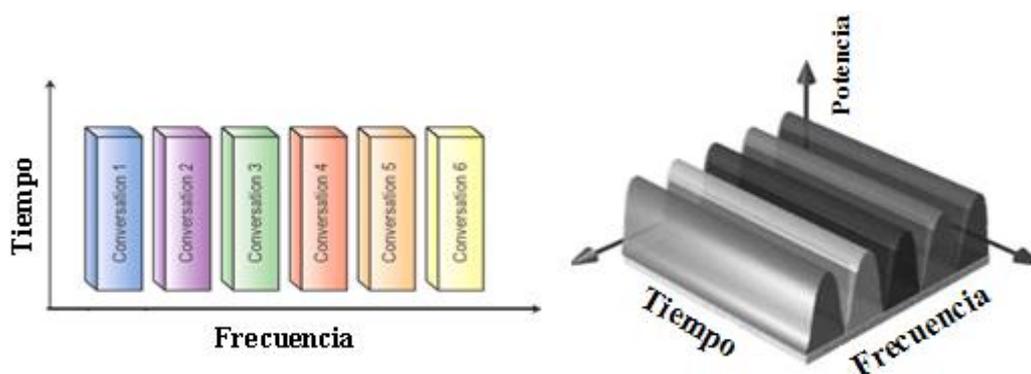
### **1.2.1 Acceso Múltiple por División de Frecuencias (FDMA)**

FDMA es sin duda el primer método empleado para acceso múltiple en tecnologías inalámbricas. En FDMA el ancho de banda del sistema de comunicación es dividido en bandas de frecuencia menores con una separación suficiente (banda de guarda) para evitar interferencias entre canales adyacentes.

En FDMA a cada usuario se le asigna una banda de frecuencia en particular, de manera tal que un usuario puede emplear un canal de transmisión todo el tiempo. Sin

embargo esa banda de frecuencia es desperdiciada mientras el usuario no transmite información.

Se debe tener en cuenta que esta técnica de acceso múltiple no requiere que los usuarios sean sincronizados para poder disponer de un canal.



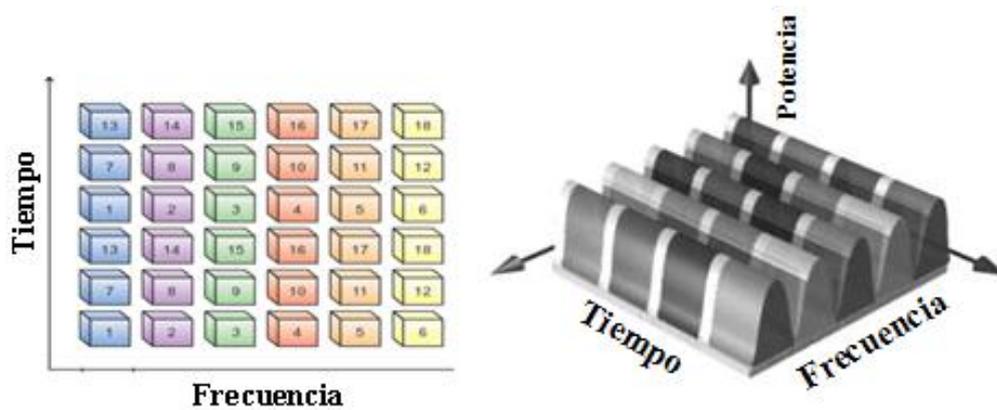
**Figura 1.1.** Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA) [1]

Las gráficas anteriores muestran como el ancho de banda es dividido entre N usuarios, cada uno de ellos con un ancho de banda fijo y entre ellos existe una separación (banda de guarda) para evitar traslapes.

### 1.2.2 Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA)

En TDMA múltiples usuarios van a realizar una transmisión empleando la misma portadora pero dicha portadora será utilizada por dichos usuarios en diferentes tiempos, es decir el tiempo es dividido en intervalos de igual duración denominados *time slots*, y cada uno de ellos a su vez es dividido en N partes (cada una de estas divisiones corresponde a un usuario). Un usuario puede transmitir durante el intervalo de tiempo que le corresponde en cada *time spot*. Este proceso es tan rápido que parecería que un usuario utiliza dicha portadora todo el tiempo y no únicamente por intervalos.

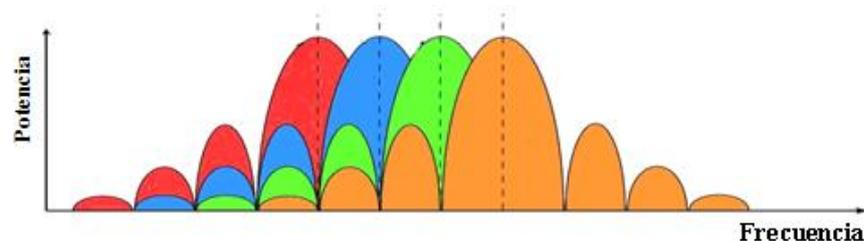
En TDMA es necesario considerar tiempos de guarda para evitar traslape de información. El mayor inconveniente que presenta TDMA es que requiere de sincronización por parte de todos los usuarios a fin de evitar interferencias entre ellos, siendo por este motivo su implementación mucho más compleja que la de FDMA.



**Figura 1.2.** Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA) [1]

### 1.2.3 Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA)

Esta técnica se basa en la modulación multiportadora y el acceso múltiple por división de frecuencia. La idea básica de la modulación multiportadora es dividir una señal de banda ancha en subportadoras paralelas sin que estas se traslapen. Sin embargo en OFDMA puede darse el traslape sin afectar la información a enviar ya que las subportadoras en OFDMA son matemáticamente ortogonales, de esta manera la información enviada puede ser extraída de manera individual sin importar el traslape entre las subportadoras. De este modo se ayuda a reducir la interferencia causada por portadoras vecinas y se emplea el espectro de una manera más eficiente debido a que el espaciamiento entre subportadoras es reducido.



**Figura 1.3.** Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA)

### 1.2.4 Acceso Múltiple por División de Espacio (SDMA)

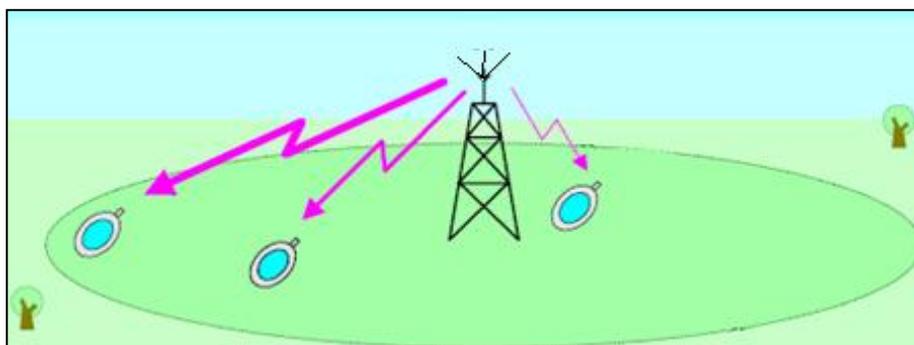
En un sistema SDMA se asigna un segmento del espacio para transmitir señales electromagnéticas, es decir se separa el espacio de transmisión. Se debe reducir la potencia

de transmisión para evitar la interferencia con las transmisiones vecinas. De este modo se puede asignar la misma frecuencia a otros transmisores en la misma región geográfica. Para incrementar la cobertura basta con agregar un nuevo transmisor al sistema.

El SDMA es una técnica que optimiza el espectro y minimiza los costos aprovechando las características direccionales de las antenas.

SDMA se emplea en todos los sistemas celulares, analógicos o digitales. Por tanto, los sistemas celulares se diferencian de otros sistemas de radio solamente porque emplean SDMA. Los sistemas de radio celulares, permiten el acceso a un canal de radio, siendo éste reutilizado en otras celdas dentro del sistema. El factor que limita SDMA es el factor de reutilización de frecuencia (interferencia co-canal).

La base del algoritmo SDMA es formado por células y antenas sectorizadas que constituyen la infraestructura que pone en práctica la multi-canalización por división de espacio (SDM).



**Figura 1.4.** Acceso Múltiple por División de Espacio (SDMA)

### 1.2.5 Acceso Múltiple por División de Código (CDMA)

CDMA es una técnica que no lleva a cabo un acceso múltiple mediante una división de las transmisiones de los diferentes usuarios en frecuencia o tiempo, en lugar de eso se realiza una división asignando a cada usuario un código diferente, de esta manera es posible que múltiples usuarios puedan transmitir de manera simultánea sobre el mismo canal. Cada dispositivo que emplea CDMA está programado con un pseudocódigo, el cual

se utiliza para extender una señal de baja potencia sobre un espectro de frecuencias amplio o banda ancha mediante la técnica de Espectro Esparcido (*Spread Spectrum*). Si el receptor recibe múltiples señales de banda ancha se utilizará el código asignado a un usuario en particular para transformar la señal de banda ancha recibida de ese usuario y recuperar la información original. Durante este proceso de recuperación, la potencia de la señal deseada es comprimida dentro del ancho de banda original, mientras las otras señales de banda ancha del resto los usuarios aparecen como ruido ante la señal deseada.

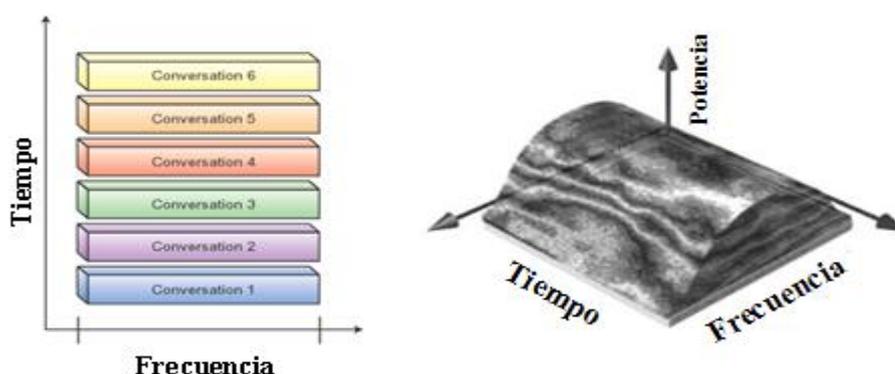


Figura 1.5. Acceso Múltiple por División de Código (CDMA) [1]

Tabla 1.1. Comparación de Técnicas de Acceso Múltiple

Método	SDMA	TDMA	FDMA	CDMA
<b>Divide en</b>	<i>Espacio</i> (Segmenta el espacio aéreo por sectores)	<i>Tiempo</i> (Segmenta tiempo de transmisión)	<i>Frecuencia</i> (Segmenta el ancho de banda)	<i>Código</i> (Segmenta códigos en espectro disperso)
<b>Terminales</b>	Una activa por sector	Todas activas en diferentes tiempos	Cada terminal posee su propias frecuencia	Todas activas
<b>Separación de Señal</b>	Antenas Direccionales estructura de célula	Sincronización en el dominio del tiempo	Filtrado en el dominio de la frecuencia	Código más receptores especiales
<b>Ventajas</b>	Muy simple incrementa capacidad	Muy flexible	Simple, robusto.	Flexible, menor cantidad de planeación necesaria.
<b>Desventajas</b>	Inflexible, antenas fijas	Sincronización complicada, requiere tiempos de guarda	Inflexible, las frecuencias son un recurso caro	Receptores complejos, requiere control de potencia

### ***Espectro disperso (Spread Spectrum).***

Al desarrollar sistemas de comunicación digital es debe tratar de emplear el ancho de banda disponible del canal de comunicación de una manera óptima y utilizando la menor potencia posible para proveer servicios de comunicación con una calidad adecuada. Para lograr dicho objetivo se debe considerar aspectos tales como la inmunidad de la señal frente a interferencias y confidencialidad en las comunicaciones, y esto se logra empleando la técnica de modulación de espectro extendido, la cual es requerida para poder llevar a cabo acceso múltiple por división de códigos.

Una de las principales ventajas de emplear la modulación de espectro esparcido es la alta inmunidad que se obtiene frente a interferencias de usuarios que utilizan el mismo canal de comunicación o interferencias intencionales por parte de personas que desean bloquear la comunicación (*jamming*).

La técnica esparcimiento de espectro consiste en distribuir la potencia de una señal en un ancho de banda mayor al de la información. Dicho esparcimiento se lleva a cabo al serle agregada a la señal de información un código pseudoaleatorio con una velocidad de transmisión mayor. De este modo se obtiene una señal con una densidad de potencia comparable al ruido, requiriendo un ancho de banda amplio en relación con la información en banda base, mientras que la cantidad de energía total de la señal de información en banda base debe ser la misma que la señal *Spread Spectrum*.

Se debe tener muy en cuenta la ecuación de la capacidad de canal de Shannon, es decir que la relación señal a ruido (SNR) se puede disminuir sin que aumente la tasa de error de bit, esto implica que si la señal se esparce sobre un ancho de banda grande con un menor nivel de potencia espectral, aún se puede lograr la tasa de transmisión requerida. Si la potencia de la señal se interpreta como la zona bajo la densidad espectral de potencia, entonces señales con la potencia total equivalente pueden tener o una potencia grande de la señal concentrada en un ancho de banda pequeño o una potencia pequeña esparcida sobre un ancho de banda grande.

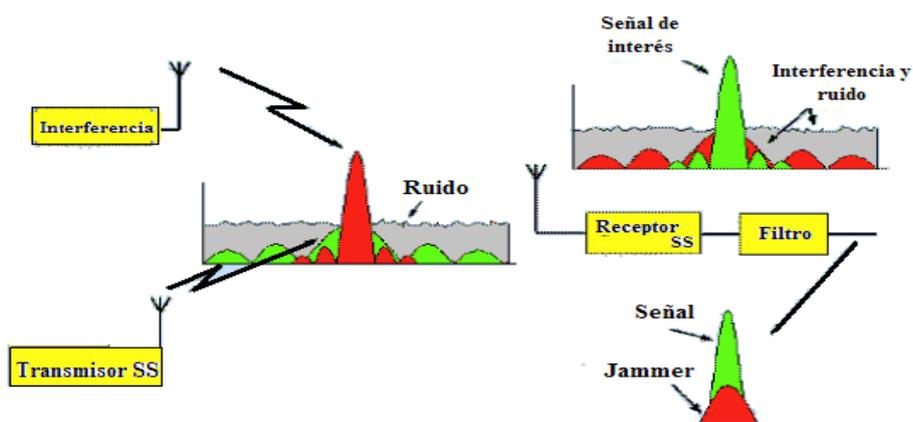


Figura 1.6. Técnica de Espectro Esparcido [2]

### *Técnicas de Modulación Spread Spectrum.*

Las técnicas de modulación Spread Spectrum fueron originalmente desarrolladas para sistemas de comunicación militares debido a su resistencia ante señales de interferencia y por su baja probabilidad de detección. Los métodos de modulación para generar *Spread Spectrum* son los siguientes:

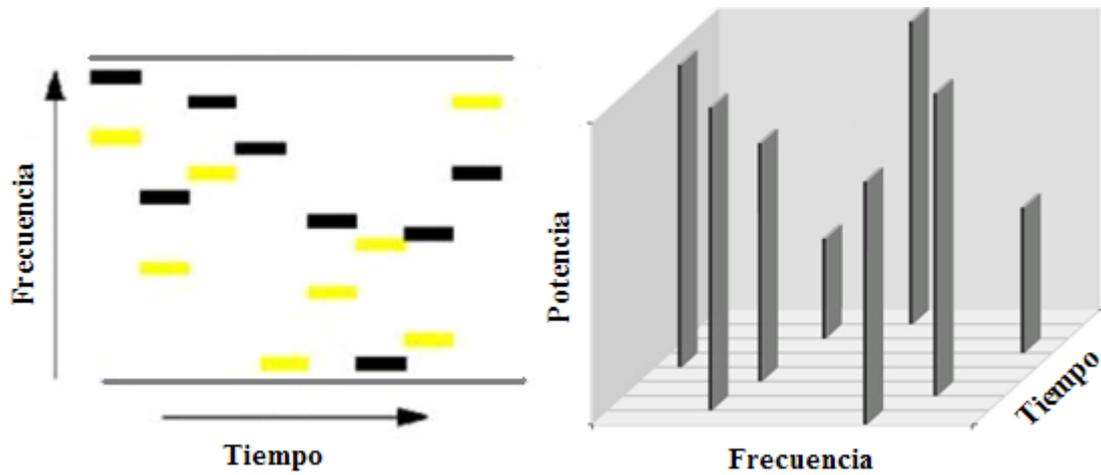
- FHSS (Espectro Esparcido por Saltos de Frecuencia)
- THSS (Espectro Esparcido por Saltos de Tiempo)
- DSSS (Espectro Esparcido por Secuencia Directa)
- HSS (Espectro Esparcido Híbrido)

#### *Espectro Esparcido por Saltos de Frecuencia.*

Esta técnica consiste en tomar la señal en banda base a ser transmitida y modularla con una señal portadora que realiza saltos de frecuencia en función del tiempo dentro de un ancho de banda asignado. El cambio periódico de frecuencia de la portadora reduce la interferencia producida por señales de banda angosta, afectando únicamente si ambas señales se transmiten en la misma frecuencia y en el mismo instante de tiempo.

Empleando saltos de frecuencia es posible que varios usuarios empleen la misma banda de frecuencia sin que se interfieran, asumiendo que cada uno de ellos emplea un

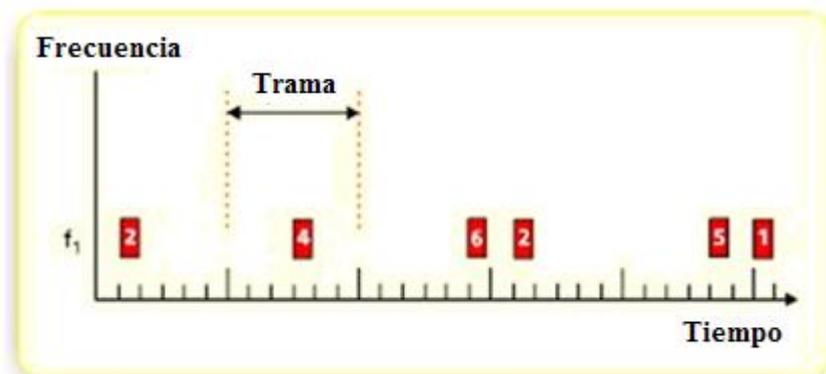
patrón de salto diferente. De esta forma si dos patrones de salto nunca utilizan la misma frecuencia se dice que son ortogonales.



**Figura 1. 7.** Principio de Espectro Esparcido por Saltos de Frecuencia [3]

#### *Espectro Esparcido por Saltos de Tiempo.*

Con esta técnica información es transmitida durante determinados intervalos de tiempo en base a un código asignado a cada usuario. Con esta técnica un periodo de tiempo es dividido en intervalos denominados tramas y éstos a su vez divididos en  $M$  intervalos de tiempo más pequeños llamados *time slots*. De esta forma en la señal de un usuario no es transmitida en forma continua, sino por intervalos de tiempo contando cada usuario con un código asignado.



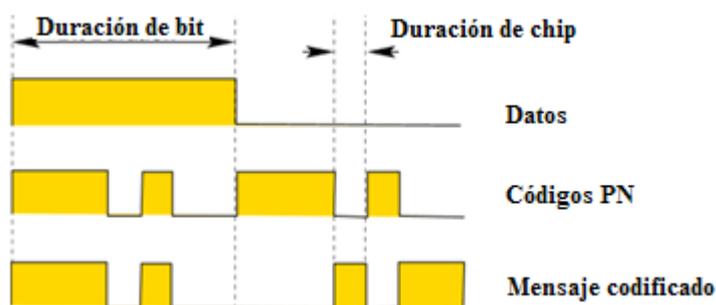
**Figura 1. 8.** Principio de Espectro Esparcido por Saltos de Tiempo [4]

### *Espectro Esparcido por Secuencia Directa.*

Cuando se emplea esta técnica cada bit de la señal original es representado por múltiples bits utilizando un código de esparcimiento, el cual esparce la señal dentro de un ancho de banda en proporción directa al número de bits utilizados.

El esparcimiento de la información es llevado a cabo utilizando una señal denominada código pseudoaleatorio, la cual es independiente de la información y cuenta con una velocidad de transmisión mayor al de la señal de información.

La combinación de la señal de información y el código pseudoaleatorio o también llamado código de esparcimiento se realiza mediante la operación OR exclusiva (XOR), obteniéndose de este modo la señal a ser transmitida. Por su parte el receptor debe contar con el código de esparcimiento correcto para recuperar la información.



**Figura 1. 9.** Principio de Espectro Esparcido por Secuencia Directa [5]

### *Espectro Esparcido Híbrido.*

Un sistema híbrido se lo realiza con el fin de combinar las ventajas específicas de cada técnica de modulación y se forma de la combinación de dos tipos de técnicas de espectro esparcido. De las técnicas de espectro extendido podemos tener algunos posibles sistemas híbridos como: DS/FH, DS/TH, FH/TH, DS/FH/TH.

### ***Secuencias de Esparcimiento.***

Una secuencia de esparcimiento idealmente debería ser aleatoria, pero esto no ocurre así pues tanto el transmisor como el receptor deben conocer dicha información, por lo tanto es necesario generar secuencias que aparenten ser aleatorias. Estas secuencias son creadas por un generador de pseudo ruido (PN) en base a algoritmos determinísticos mismos que producen secuencias no aleatorias estadísticamente (pseudoaleatorias), los bits pseudo randómicos empleados en este proceso se los conoce como chips.

Las principales características con las que deben contar las secuencias PN son la aleatoriedad e imprevisibilidad para evitar una posible interceptación de la información o recepción de señales que no correspondan a un determinado usuario.

### **1.3 SISTEMAS DÚPLEX**

Un sistema de comunicaciones móviles del tipo *dúplex* es aquel donde existe comunicación simultánea en los dos sentidos. Para conseguir esto existe una técnica donde son utilizadas dos bandas de frecuencia separadas, una para el canal directo y otra para el canal reverso. Esta técnica es llamada duplexión por división de frecuencias FDD (*Frequency Division Duplex*). Las dos bandas del espectro son separadas por una banda de guarda para aislar las dos señales.

Existe también otra técnica, donde los dos canales directo y reverso operan en la misma frecuencia y son multiplexados en el tiempo, es decir, en un determinado momento el canal es utilizado para transmitir la señal de *uplink*, y en otro momento para transmitir la señal de *downlink*. Esta operación es llamada duplexión por división de tiempo TDD (*Time División Duplex*). La técnica TDD requiere de un tiempo de guarda entre el flujo de transmisión y de recepción.

## 1.4 EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN MÓVILES

La telefonía móvil ha tenido distintos grados de evolución y a estas etapas se les ha denominado generaciones, así desde el comienzo de la era de la telefonía celular en la década de los 70 [6], las comunicaciones móviles sin duda alguna han experimentado un enorme crecimiento desarrollándose diversas tecnologías y sistemas para dar servicios de comunicación inalámbrica.

En general el desarrollo de los sistemas celulares en sus diferentes generaciones ha evolucionado como se indica en la figura 1.1.

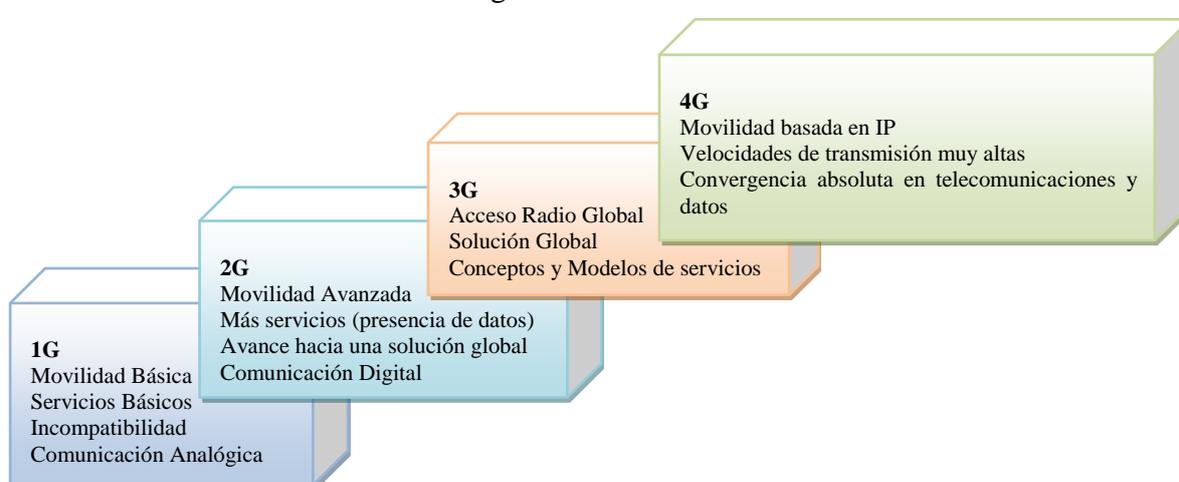


Figura 1.10. Generaciones Celulares

### 1.4.1 Primera Generación (1G)

Los sistemas móviles de primera generación (1G) se caracterizaron por realizar transmisiones de tipo analógico de servicios de voz con niveles de baja calidad, con una velocidad de 2400 baudios y utilizando para su funcionamiento la técnica FDMA, lo que hacía a estos sistemas limitados en relación al número de usuarios a los que podía dar servicio, además de contar con una limitada capacidad de *roaming*.

El primer sistema celular analógico comercial empezó a operar en Japón en el año 1979, dicho sistema fue desarrollado por la compañía de Telefonía y Telegrafía de Japón (NTT). En 1981 se introduce el sistema *Nordic Mobile Telephone System* o NMTS450 mismo que empezó a operar en Dinamarca, Suecia, Finlandia y Noruega en la banda de

450 MHz. Por su parte en Estados Unidos a partir de 1983 comenzó a utilizarse el sistema AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*) que operaba en la banda de los 800 MHz y ofrecía 832 canales con 30 kHz. cada uno, fue aquí cuando el término celular fue empleado por primera vez haciendo referencia al sistema analógico AMPS, el significado para esta palabra se dio debido a una determinada área dividida en regiones idealmente idénticas de forma circular, mismas que eran conocidas como células. En el año 1985 Gran Bretaña a partir de AMPS adoptó el sistema TACS (*Total Access Communications System*), el cual contaba con 1000 canales de 25 kHz cada uno y que operaba en la banda de 900 MHz. Durante la década de los 80's fueron apareciendo otros sistemas de primera generación como el estándar Alemán C-Netz y *French Radiocom 2000* de Francia entre otros.

La tabla 1.1 muestra los sistemas de telefonía celular analógicos de mayor relevancia, haciendo mención de la cantidad de canales con que contaban estos sistemas y el ancho de banda que requería cada uno de sus canales.

**Tabla 1.2.** Sistemas de Telefonía Celular Analógica

Sistema	País	Número de canales	Ancho canal (kHz)
AMPS	Estados Unidos	832	30
C-450	Alemania	573	10
TACS	Reino Unido	1000	125
ETACS	Reino Unido	1240	25
JTACS	Japón	800	12.5
NMT-900	Escandinavia	1999	12.5
NMT-450	Escandinavia	180	25
NTT	Japón	2400	6.25
Radiocom – 2000	Francia	200	25

#### 1.4.2 Segunda Generación (2G)

Debido a la limitada cantidad de canales que se pueden tener en un ancho de banda con la técnica de acceso FDMA empleado durante la primera generación, se propusieron diferentes y nuevas alternativas para incrementar la cantidad de usuarios simultáneos en los sistemas de comunicaciones móviles, dentro de estas propuestas aparecen TDMA y CDMA las cuales se constituirían en las tecnologías predominantes de esta segunda generación. En el año de 1993 IS-95 (*Interim Standard 95*) como el primer sistema que

emplea CDMA, mientras que en el año 1992 surge IS-54 (*Interim Standard 54*) como el primer sistema que utilizó la tecnología TDMA.

La segunda generación se caracteriza especialmente por ser digital, y esto trajo consigo la reducción de tamaño, costo y consumo de potencia en los dispositivos móviles, además de transmitir voz y datos digitales de volúmenes bajos, por ejemplo, mensajes de texto (SMS siglas en inglés de *Servicio de mensajes cortos*) o mensajes multimedia (MMS siglas en inglés de *Servicio de mensajes multimedia*), identificador de llamadas, conferencia tripartita, entre otros.

Con los sistemas de telefonía celular de segunda generación se logró emplear velocidades de transmisión de información de 9,6 kbps., siendo ésta mayor para voz con respecto a la primera generación pero muy limitada en lo que respecta a la comunicación de datos. Adicionalmente con los sistemas 2G se logró avances significativos en cuanto a seguridad, calidad de voz y de *roaming*.

Dentro de los sistemas de telefonía celular de segunda generación se pueden destacar GSM, TDMA IS-136, y CDMA IS-95.

### ***TDMA.***

TDMA fue desarrollado durante 1992 por *Southwest Bell* y *Bell South*. Inicialmente su adopción fue muy lenta. Debido a que los canales físicos de TDMA son los mismos canales físicos de la tecnología de primera generación AMPS, TDMA pudo migrar fácilmente e inclusive coexistir con AMPS.

En TDMA se subdivide cada uno de los 30 kHz de los canales de AMPS en 3 canales TDMA, cada uno de los cuales es capaz de soportar una simple llamada telefónica [7].

### *TDMA IS-136.*

Este sistema fue introducido por la compañía AT&T, siendo el objetivo principal de este estándar digital el aumentar la capacidad dentro de la banda de los 800 MHz respecto al sistema AMPS. Por ello TDMA IS-136 es también conocido como Digital AMPS (DAMPS). Con el fin de mejorar se agregó un canal extra al diseño híbrido de IS-54. IS-136 usa TDMA tanto para voz como para el canal de control. Los cambios de IS-136 respecto a IS-54 son la inclusión de SMS, y un protocolo de compresión mejorado. IS-136 en un canal de 24,3 kbaudios dando una tasa efectiva de 48,6 kbps para las seis ranuras de tiempo [8].

Un pre requisito para el sistema TDMA IS-136 constituía que los teléfonos móviles debían funcionar con los canales analógicos ya existentes y con los nuevos canales digitales, trabajando en un modo dual coexistiendo ambos sistemas.

### *GSM.*

En el continente europeo se comenzó la era de la telefonía celular con diferentes interfaces aéreas analógicas e incompatibles entre sí, surgiendo la necesidad de estandarizar todos los sistemas en uno sólo con un *roaming* transparente entre los países que cuenten con este sistema, es debido a este problema que se impulsó el desarrollo de un nuevo estándar para las comunicaciones móviles, así en el año 1982 la CEPT (*Conférence Européenne des Postes et Télécommunications*) tomó la iniciativa de poner en marcha un grupo de trabajo llamado *Groupe Spécial Mobile* (GSM), acrónimo que posteriormente cambió su significado por el de *Global System for Mobile Communications*, dicho grupo se encargó de especificar un sistema de comunicaciones móviles común para Europa en la banda de 900 MHz, banda que había sido reservada por la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones (CAMR) en 1978.

En el año 1988, en Europa se firmó un acuerdo de intenciones en el cual se comprometían a cumplir las especificaciones y adoptar el estándar GSM como único, esto después de haberse realizado pruebas de campo con el sistema GSM en Francia.

Finalmente en enero de 1992 empezó a operar el primer sistema comercial GSM desarrollado por la compañía *Oy Radiolinja AB* en Finlandia.

### *Funcionamiento y Bandas de Frecuencia de GSM.*

Los sistemas de segunda generación GSM emplean una combinación de las técnicas de acceso múltiple FDMA y TDMA en un espectro total de 25 MHz. FDMA divide esos 25 MHz en 125 frecuencias portadoras de 200 kHz cada una. Cada canal de 200 kHz es entonces dividido en 8 ranuras de tiempo utilizando TDMA. Bajo este esquema los sistemas GSM soportan velocidades de hasta 9,6 kbps.

**Tabla 1.3.** Bandas de frecuencias para GSM [9]

Banda	Nombre	Canales	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)	Notas
<b>GSM 850</b>	GSM 850	128-251	824 – 849	869 – 894	Usada en USA, Sudamérica y Asia
<b>GSM 900</b>	P-GSM 900	1-125	890 – 915	935 – 960	Banda con que nació GSM en Europa y la más extendida
	E-GSM 900	975-1023	880 – 890	925 – 935	Extensión de GSM 900
	R-GSM 900	n/a	876 – 880	921 – 925	GSM ferroviario
<b>GSM 1800</b>	GSM 1800	512-885	1710 – 1785	1805 – 1880	
<b>GSM 1900</b>	GSM 1900	512-810	1850 – 1910	1930 – 1990	Usada en Norteamérica, incompatible con GSM 1800 por solapamiento de bandas.

### **CDMA IS-95.**

En el año 1992 la compañía Qualcomm desarrolló un sistema celular basado en la técnica de acceso múltiple CDMA, posteriormente en el año de 1993 el sistema creado por Qualcomm fue modificado y adoptado por la TIA bajo el nombre IS-95, conocido también como *cdmaOne*. En 1995 finalmente fue el lanzamiento del primer sistema comercial basado en CDMA IS-95A en Hong Kong por el operador *Hutchison Telecom*. Este estándar fue creado para trabajar en las bandas de 800 y 1900 MHz.

CDMA IS-95 es un sistema que soporta servicios de datos mediante conmutación de circuitos a velocidades entre 9,6 kbps y 14,4 kbps. Siguiendo la evolución del sistema IS-95 surge el protocolo IS-95B basándose en conmutación de paquetes. El sistema IS-95B es considerado de generación 2.5, ofreciendo una velocidad máxima de transferencia de datos de 64 kbps, manteniendo compatibilidad hacia atrás con los sistemas existentes de IS-95A.

A diferencia del ancho de banda de los canales en los sistemas GSM y TDMA, en CDMA se utiliza un espectro de 1,25 MHz donde cada usuarios tiene acceso, contando cada usuario con un código para poderse diferenciar del resto de los usuarios y optimizando de esta forma el uso del espectro. Por lo anterior con CDMA se incrementa la capacidad del sistema de 10 a 15 veces comparado con AMPS, y más de tres veces comparado con los sistemas basados en TDMA.

### **1.4.3 Segunda Generación y media (2.5G)**

2.5G se considera como un paso entre tecnologías inalámbricas celulares 2G y 3G. El término “segunda generación y media” es empleado para describir sistemas 2G que tienen implementado un dominio basado en conmutación de paquetes en adición al dominio de conmutación de circuitos.

La generación 2.5G corresponde a mejoras tecnológicas en las redes 2G con tendencia a entregar capacidades 3G con una velocidad que puede llegar hasta los 384 kbps, ya adecuada para muchas aplicaciones en la transferencia de datos.

Esta generación ofrece varios de los beneficios que posee 3G y puede utilizar la estructura 2G existente tanto para redes GSM y CDMA, así por ejemplo GPRS es una tecnología 2.5G empleada por los operadores de GSM.

#### ***Evolución hacia 3G.***

La evolución comienza con una actualización de la red GSM, con la capacidad para paquetes de datos mediante el agregado de GPRS. Esto permite que los usuarios finales

ingresen en la experiencia “*Always Best Connected (ABC)*” que constituye un concepto que permite a las personas conectarse a aplicaciones empleando dispositivos y tecnologías de acceso que mejor se adapte a sus necesidades.

*HSCSD (High Speed Circuit-Switched Data).*

Siglas en inglés de Circuito de Switcheo de datos de alta velocidad. Se caracteriza por aumentar la capacidad de transmisión de GSM agrupando hasta 8 time-slots de un canal con velocidades de  $N \times 9,6$  kbps con valores de  $N$  desde 1 hasta 6, pudiendo HSCSD transmitir hasta 57,6 kbps en modo circuito conmutado. Aquí el número de *time-slots* utilizado puede ser variable dependiendo de la saturación de la celda donde se encuentre el móvil pero el ancho de banda no se utiliza eficientemente pues se trata de conmutación de circuitos.

*GPRS (General Packet Radio Service).*

Siglas en inglés de Servicio General de Paquetes vía Radio es una extensión del Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM) para la transmisión de datos no conmutada (o por paquetes).

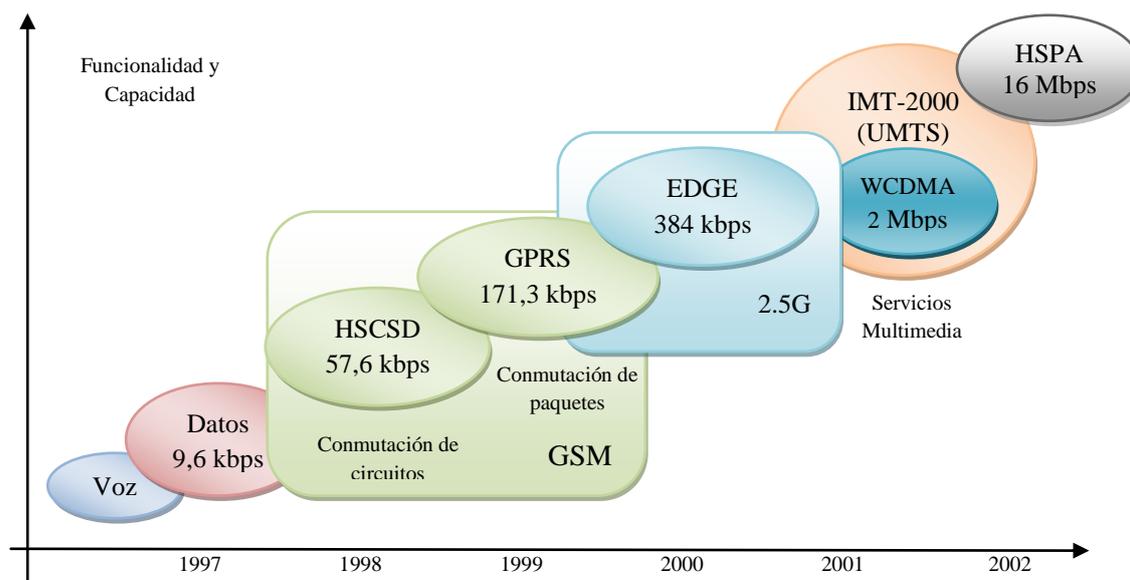
GPRS se puede utilizar para servicios tales como *Wireless Application Protocol* (WAP), SMS, MMS, Internet, para los servicios de comunicación, como el correo electrónico y la *World Wide Web* (WWW) y servicios P2P utilizando el protocolo IP .

GPRS da mejor rendimiento a la conmutación de paquetes de servicios, en contraposición a la conmutación de circuitos, donde una cierta calidad de servicio (QoS) está garantizada durante la conexión. Por este motivo, se considera más adecuada la conexión conmutada para servicios como la voz que requieren un ancho de banda constante durante la transmisión, mientras que los servicios de paquetes como GPRS se orientan al tráfico de datos, se debe mencionar además que con esta tecnología se manejan velocidades de hasta 171,3 kbps (pico) empleando los 8 canales de tiempo de GSM, en la práctica se manejan velocidades de 53,6 kbps [10].

*EDGE (Enhanced Data-rates for GSM Evolution).*

EDGE hace mención a las siglas en inglés de Tasas de Datos Mejoradas para la evolución de GSM), también conocida como EGPRS (*GPRS* Mejorado) y fue estrenado en las redes GSM de Estados Unidos en el año 2003. Es una tecnología que actúa como puente entre las redes 2G y 3G. Aunque EDGE funciona con cualquier GSM que tenga implementado GPRS, el operador debe implementar las actualizaciones necesarias, además no todos los teléfonos móviles soportan esta tecnología.

EDGE puede alcanzar una velocidad de transmisión de 384 kbps en modo de paquetes, con lo cual cumple los requisitos de la UIT para una red 3G, también ha sido aceptado por la UIT como parte de IMT-2000, de la familia de estándares 3G.



**Figura 1.11.** Evolución de la telefonía móvil celular

#### 1.4.4 Tercera Generación (3G)

3G es la tercera generación de estándares para tecnologías de redes móviles, precedida por la mencionada 2.5G. Esta está basada en la familia de estándares de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) basados en IMT-2000.

Inicialmente la instalación de redes 3G fue demasiado lenta. Esto se debió a que los operadores requieren adquirir una licencia adicional para un espectro de frecuencias diferente al que era utilizado por las tecnologías anteriores 2G. El primer país en implementar una red comercial 3G a gran escala fue Japón. En la actualidad, existen 164 redes comerciales en 73 países usando la tecnología WCDMA [11].

Los principales motivos que han llevado a cabo la creación de una tercera generación surgen de la necesidad de aumentar la capacidad de las redes móviles que permiten un número limitado de usuarios por la técnica de acceso múltiple a emplear y que en cuanto se sobrepasa ese límite, la congestión no permite que más usuarios puedan establecer comunicación; además el incremento de tráfico móvil, necesitándose entonces mayor espectro y optimización del mismo para proveer de servicio a más usuarios, finalmente se debe considerar la aparición de nuevos servicios donde la convergencia con Internet y el aumento de aplicaciones multimedia generará un aumento significativo de tráfico en las redes móviles. Adicionalmente el empleo de la tecnología HSPA (*High Speed Packet Access*) permitirá manejar velocidades de 14,4 Mbps en *downlink* y 5,8 Mbps en el *uplink* [11].

### ***Velocidades de transmisión en 3G.***

La Unión Internacional de Telecomunicaciones no ha ofrecido una definición clara de la velocidad que los usuarios pueden esperar de los equipamientos 3G. Aunque se afirma que se espera que IMT-2000 estandarice tasas de transmisión de un mínimo de 2 Mbps para usuarios que estén en movimiento o quietos, y 348 kbps en vehículos en movimiento. A menudo las fuentes de la industria manifiestan que se puede esperar que el 3G ofrezca velocidades de 384 kbps a personas mientras caminan, pero solo 128 kbps en autos en movimiento.

### ***Estandarización de la Red 3G.***

La UIT definió las demandas de redes 3G con el estándar IMT-2000. Una organización llamada *Third Generation Partnership Project* (3GPP) ha continuado ese trabajo mediante la definición de un sistema móvil que cumple con dicho estándar, este sistema se llama Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal (UMTS).

*IMT-2000.*

Las Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (IMT-2000) son la norma mundial para la tercera generación de comunicaciones inalámbricas, definida por un conjunto de Recomendaciones interdependientes de la UIT. Las actividades que realiza la UIT en lo que concierne a las IMT-2000 abarcan la normalización internacional, lo que incluye las especificaciones de espectro de radiofrecuencias de carácter técnico para los componentes radioeléctrico y de red, las tarifas y la facturación, la asistencia técnica y los estudios sobre aspectos de reglamentación y política [13].

*Requerimientos de un sistema de tercera generación.*

Los ítems a continuación [14] son aspectos que deben ser tomados en cuenta para considerar a un sistema como de tercera generación y ser interface IMT-2000:

- Calidad de voz comparable a la que ofrece una red telefónica pública (PSTN).
- Velocidades de transmisión de datos de 144 kbps para usuarios en vehículos en movimiento viajando a una velocidad de 120 km/h en ambientes exteriores.
- Velocidades de transmisión de datos de 384 kbps para peatones que se encuentren en un sólo lugar o bien moviéndose sobre áreas pequeñas.
- Soporte para operaciones de 2,048 Mbps en oficinas, es decir en ambientes estacionarios de corto alcance o en interiores.
- Soporte para ambos servicios de datos: conmutación por paquetes y conmutación por circuitos.
- Soporte IP para acceso a Internet (navegación WWW, comercio electrónico, vídeo y audio en tiempo real).
- Una interfaz adaptada para las comunicaciones móviles de Internet que permita un ancho de banda más grande para enviar información que para recibir, contando así con un ancho de banda dinámico en función de la aplicación y de esta manera optimizar el espectro de frecuencia con el que se dispone.
- Capacidad de proveer servicios simultáneos a usuarios finales y terminales.
- *Roaming* internacional entre diferentes operadores y tipos de redes.

*Asignación de espectro para IMT-2000.*

La asignación de espectro para IMT-2000 se realizó en la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones 1992, CAMR 92, asignando 230 MHz en las bandas 1885-2025 MHz y 2110-2200 MHz.

IMT-2000 comprende también una componente satelital que facilitará los aspectos de *roaming* internacional, así como la obtención de comunicaciones en lugares donde no haya disponibilidad de sistemas terrestres, complementando las celdas macro, micro y pico.

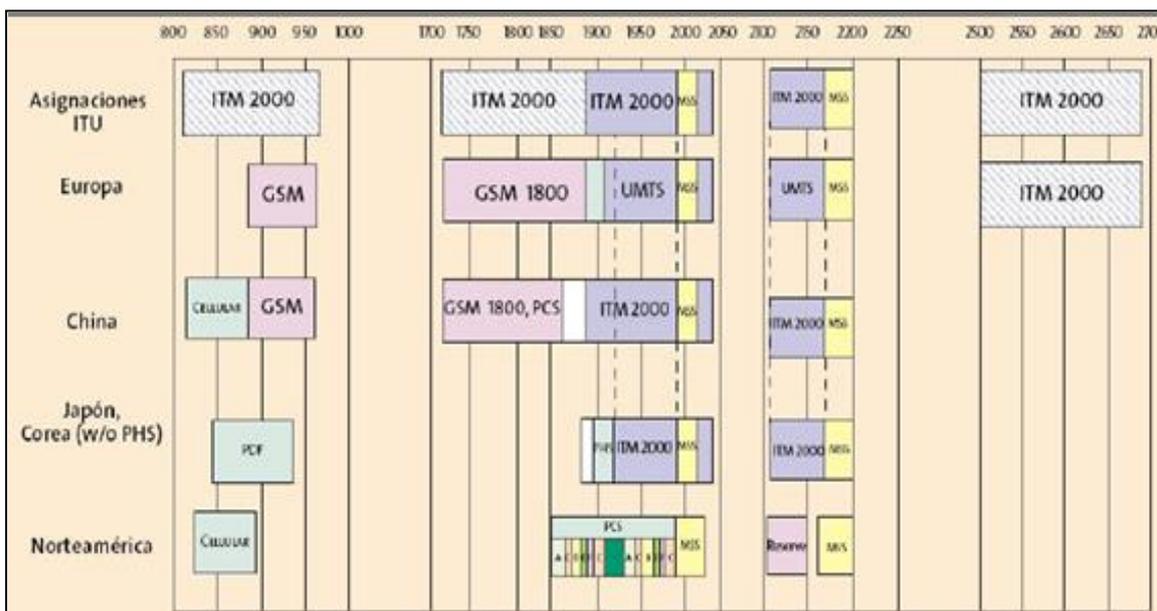
**Tabla 1.4.** Asignación de espectro para IMT-2000 [15]

Componente Terrenal

Rango de Frecuencias
806-960 MHz
1710-1885 MHz
1885-1980 MHz
2010-2025 MHz
2110-2200 MHz
2500-2690 MHz

Componente Satelital

Rango de Frecuencias
1980-2010 MHz
2170-2200 MHz
2500-2520 MHz
2670-2690 MHz



**Figura 1.12.** Bandas de Frecuencias para IMT-2000 [15]

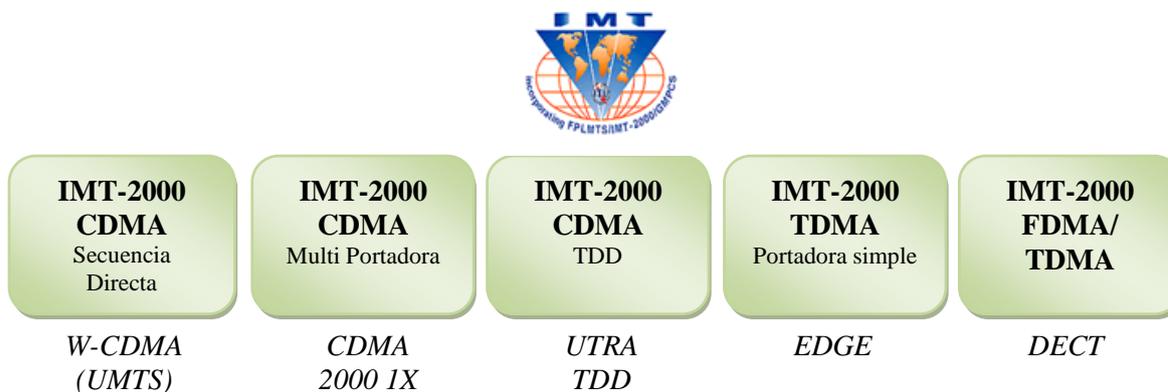
### Interfaces Aéreas IMT-2000.

Uno de los elementos más importantes para la definición de las características operativas del IMT-2000 es la selección de la Tecnología de Transmisión de Radio (RTT), también denominada interface aérea entre la estación base y la terminación móvil del usuario.

La reunión del Grupo de Expertos en radiocomunicaciones sobre las IMT-2000 celebrada en Helsinki en 1999 aprobó un conjunto completo de especificaciones de interfaz radioeléctrica terrenal y de satélite para las IMT-2000. Estas especificaciones poseen la flexibilidad que necesitan los operadores móviles para pasar sin problemas de sus redes anteriores a las IMT-2000 a las capacidades de servicio de la tercera generación, y para satisfacer las diferentes necesidades específicas de los operadores de los nuevos sistemas de satélites y terrenales.

Las especificaciones técnicas de las RTT terrestres aprobadas fueron [16]:

- IMT-2000 CDMA *Direct Spread* (UTRA W-CDMA)
- IMT-2000 CDMA *Multi-Carrier* (CDMA-2000)
- IMT-2000 CDMA TDD (UTRA TD-CDMA)
- IMT-2000 TDMA *Single-Carrier* (UWC-136)
- IMT-2000 FDMA/TDMA (DECT).



**Figura 1.13.** Interfaces radioeléctricas del IMT-2000

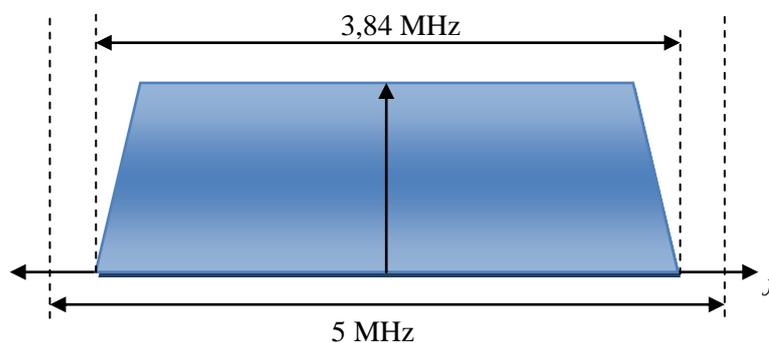
## 1.5 INTERFAZ RADIOELÉCTRICA WCDMA

La principal tecnología de radio empleada en los sistemas móviles de tercera generación (UMTS) es WCDMA (*Wideband CDMA*) y sus principales variantes son FDD (Duplexión por División de Frecuencia) y TDD (Duplexión por División de Tiempo). En 3GPP, WCDMA es llamado UTRA (*Universal Terrestrial Radio Access*).

Al igual que CDMA tradicional, el WCDMA emplea como técnica subyacente el espectro esparcido; sin embargo, al emplear una señalización y un canal de control distinto, un mayor ancho de banda y un conjunto de funcionalidades mejoradas para reunir los requisitos para tecnologías 3G, la diferencia entre ambas tecnologías es notable.

La tecnología WCDMA emplea la técnica de Espectro Esparcido por Secuencia Directa (DSSS), este proceso básico ofrece a WCDMA robustez, flexibilidad, resistencia a las interferencias y solidez contra interferencias mal intencionadas (*jamming*) y las interceptaciones ajenas.

Para poder poner en práctica su eficiencia, el método WCDMA utiliza un ancho de banda mayor que el de CDMA, esto le permite emplear varios canales de la interfaz de radio. En la figura a continuación se puede apreciar que el ancho de banda efectivo de la interfaz aérea de WCDMA es 3,84 MHz y asciende a 5 MHz con las bandas de protección [17].



**Figura 1.14.** Portadora de WCDMA y sus dimensiones

La tecnología de radio WCDMA puede operar en diferentes bandas de frecuencia, como se describe en la tabla a continuación:

**Tabla 1. 5** Bandas de frecuencias para WCDMA según 3GPP [17]

<i>Banda de Operación</i>	<i>Frecuencias en Dirección Ascendente (MHz) (Equipo de Usuario → Estación Base)</i>	<i>Frecuencias en Dirección Descendente (MHz) (Estación Base → Equipo de Usuario)</i>
<i>Banda Central WCDMA</i>	1920 – 1980	2110 – 2170
<i>1900 MHz</i>	1850 – 1910	1930 – 1990
<i>1800 MHz</i>	1710 – 1785	1805 – 1880
<i>1,7 / 2,1 GHz (USA)</i>	1710 – 1770	2110 – 2170
<i>UMTS850</i>	824 – 849	869 – 894
<i>UMTS800 (Japón)</i>	830 – 840	874 – 885

De manera similar que en DS-CDMA (CDMA con Secuencia Directa), la señal de datos en WCDMA se aleatoriza con un código de pseudoruido (PN) específico para cada usuario en la parte de la unidad transmisora con el fin de ensanchar la señal por toda la banda. En la unidad receptora, la señal recibida se extrae empleando la misma secuencia de código.

### 1.5.1 Factor de esparcimiento

La velocidad binaria del código empleado para el esparcimiento de la señal original es de 3,84 Mbps. Este valor es constante en todas las variantes de WCDMA utilizadas en las redes de 3G y se conoce como Tasa de chips del sistema y se expresa como 3,84 Mcps.

Se debe analizar en qué medida se esparce la señal y esto es acorde al factor de esparcimiento asociado. El factor de esparcimiento es un multiplicador que describe el número de chips empleados en el trayecto radioeléctrico de WCDMA por cada símbolo. El factor de esparcimiento ( $K$ ) se puede expresar matemáticamente por  $K = 2^n$ , donde  $n$  es el número de chips utilizados. Al factor de esparcimiento se lo conoce también como ganancia de procesamiento y será analizado en el Capítulo 2.

### 1.5.2 Modulación

Para la modulación de los datos se emplean los esquemas QPSK para el enlace de descendente y BPSK para el enlace ascendente [18].

### 1.5.3 Codificación

Para la codificación de canal se emplean 2 opciones para Duplexión por División de Frecuencia (FDD) y tres opciones para Duplexión por División de Tiempo (TDD):

- Codificación convolucional
- Codificación Turbo
- Sin Codificación (sólo para TDD)

### 1.5.4 Tipos de Códigos utilizados por WCDMA

El sistema WCDMA emplea diferentes códigos. En teoría, debería bastar con un solo tipo de código, pero las características físicas del trayecto radioeléctrico exigen que el sistema WCDMA emplee diferentes códigos para diferentes fines. Ciertos rasgos, como la ortogonalidad y la autocorrelación, hacen que un código sea o no el adecuado para un fin específico. Existen, básicamente tres tipos de códigos de canalización, los códigos de aleatorización y los códigos de esparcimiento.

**Tabla 1.6.** Tipos de Códigos para WCDMA [17]

	Dirección ascendente	Dirección descendente
Códigos de aleatorización	Diferenciación de usuarios	Diferenciación de células
Códigos de canalización	Canales de datos y control del mismo terminal	Usuarios de una misma célula
Código de esparcimiento	Código de canalización x Código de aleatorización	Código de canalización x Código de aleatorización

Como el flujo de datos de cada usuario ocupa la banda de frecuencia completa, es necesario captar la señal correcta con la mínima distorsión. Es entonces cuando se utilizan

los códigos de esparcimiento para separar las diferentes transmisiones ensanchadas por toda la banda de frecuencia. Un código de esparcimiento es un código único y exclusivo que la red asigna al comienzo de la transacción. Se podría comparar con una llave que se emplea en ambos extremos (el dispositivo móvil y la red) para abrir la señal de banda ancha transmitida a modo de ruido.

Desde el punto de vista del código de esparcimiento, la capacidad de la célula depende de la cantidad de código de aleatorización en dirección descendente asignada a la célula. Cada código de aleatorización en dirección descendente posee un conjunto de códigos de canalización y cada llamada o transacción exige la intervención de un código de canalización. En la práctica, un código de esparcimiento es la combinación de un código de aleatorización y un código de canalización.

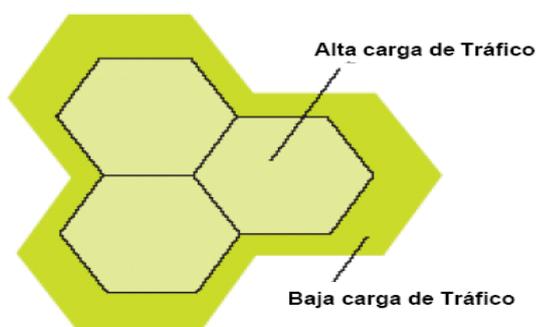
### **1.5.5 Control de Potencia**

El rápido y eficiente control de potencia es quizá el más importante aspecto en WCDMA, en particular en dirección ascendente. Sin este, un simple dispositivo móvil podría bloquear una célula. En WCDMA se realiza control de potencia en lazo cerrado.

De manera general el control de potencia implica controlar la potencia de transmisión de la señal para optimizar el rendimiento del receptor en el caso en el que múltiples usuarios se encuentren activos en la misma célula o células vecinas, o debido al problema *near-far* que consiste en que usuarios cercanos a la estación base (BTS) bloquean la recepción de las señales débiles emitidas por los dispositivos móviles lejanos a la BTS.

El control de potencia en WCDMA permite incrementar el número de usuarios por portadora al disminuir el nivel de interferencia. Esto se debe a que se realizan 1500 mediciones de la potencia por segundo [19] con lo que se puede modificar la potencia con la que transmiten tanto el móvil como la radio base, gracias a esto los niveles de interferencia son muy bajos por lo que el número de usuarios puede incrementar, optimizando de este modo la capacidad del sistema.

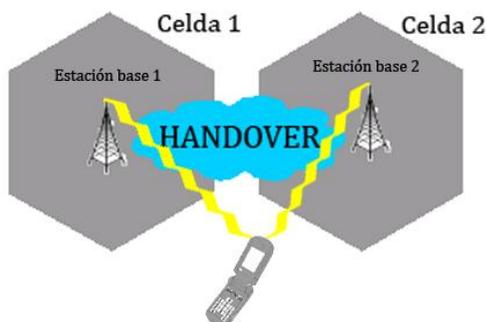
Además de disminuir el nivel de interferencia, con el control de potencia se presenta un fenómeno llamado *cell breathing*, este fenómeno significa que dependiendo del número de usuarios el tamaño de la célula puede variar, mientras con muchos usuarios el tamaño de la célula será menor, mientras menos usuarios se encuentren en el sistema la cobertura será mucho mayor.



**Figura 1. 15.** Fenómeno de *cell breathing*

### 1.5.6 Handover

Se denomina *Handover* (también *Handoff*) al sistema empleado en comunicaciones móviles celulares con el objetivo de transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente [20]. Este mecanismo garantiza la realización del servicio cuando un móvil se traslada a lo largo de su zona de cobertura.

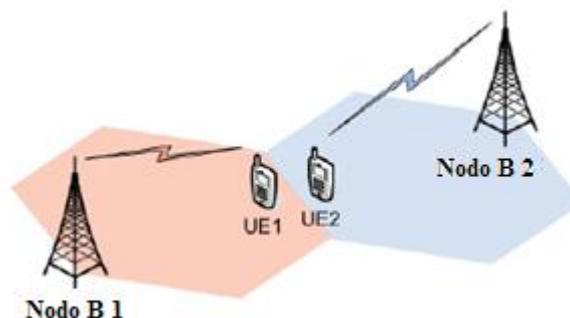


**Figura 1. 16.** Proceso de Handover

Existen tres clases de *handovers* en WCDMA, el *handover* suave (*soft handover*), el *handover* duro (*hard handover*) y el *handover* entre sistemas.

### ***Hard-Handover.***

Antes del proceso de traspaso, el móvil está conectado a su estación base origen, durante el proceso de *handover*, se desconecta de ésta y durante un tiempo (del orden de milisegundos) no está conectado a ninguna otra BTS. Mediante este procedimiento, se usa por lo tanto, un solo canal. De éste modo la conexión con la BTS original se corta antes de realizar la nueva conexión a la nueva BTS.



**Figura 1.17.** Proceso de *Hard Handover* [21]

El *handover* duro es ejecutado cuando se va a pasar de una célula con tecnología UMTS a otra célula con tecnología EDGE por ejemplo.

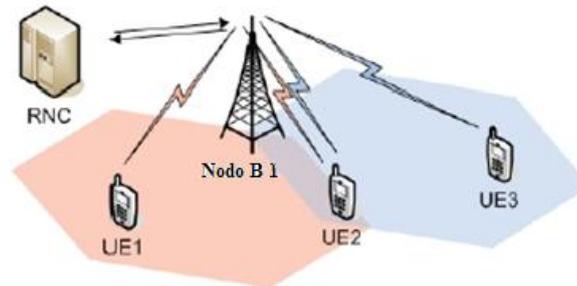
### ***Soft-Handover.***

En este caso, durante el proceso de traspaso el dispositivo móvil estará conectado mediante un canal a la estación base origen y mediante otro canal a la de destino. Durante dicho proceso, la transmisión se realiza en paralelo por los dos canales, es decir, no se produce interrupción del enlace. Con dicho sistema se asegura una conexión con la estación base de la nueva celda antes de cortar con la conexión antigua. Éste es el sistema que proporciona mucha fiabilidad, a pesar de tener, por el contrario, una difícil implementación.

En UMTS debido al empleo de varios sectores en cada estación base se puede hacer mención a dos tipos de *soft handover*:

*Softer handover.*

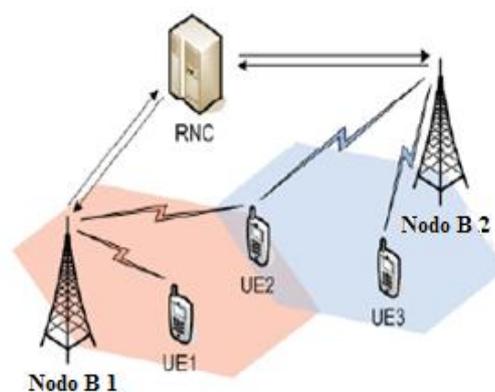
La BTS recibe dos señales separadas a través del canal de propagación. Debido a las reflexiones sobre edificios o barreras naturales, la señal enviada desde el terminal móvil llega a dos sectores distintos de la BTS. Las señales recibidas durante el proceso de *softer handover* se tratan de una manera semejante a las señales multitrayectoria.



**Figura 1.18.** Proceso de *Softer Handover* [21]

*Soft Handover.*

El *soft handover* propiamente dicho es muy similar al caso anterior de *softer handover* pero aquí las celdas pertenecen a más de un nodo. Para ello se realiza una combinación mediante el RNC (*Radio Network Controller*). Es posible realizar simultáneamente *soft* y *softer handover*.



**Figura 1.19.** Proceso de *Soft Handover* [21]

### ***Handover entre sistemas.***

El *handover* entre sistemas consiste en el cambio de un sistema a otro completamente diferente, por ejemplo, un cambio de UMTS a GSM por ejemplo. Este tipo de *handover* es el más complicado ya que se tienen que cumplir ciertos requisitos: primero el usuario debe contar con un equipo que tenga el modo dual, el *handover* toma más tiempo debido a que tiene que sincronizarse con el sistema al que está ingresando, la transmisión debe ser detenida en el sistema de origen y reiniciada en el sistema destino.

### **1.5.7 Reuso de frecuencias**

El ancho de banda siempre ha constituido el primer obstáculo en sistemas inalámbricos; parece muchas veces nunca ser suficiente. Utilizando eficientemente este recurso involucra el llamado reuso de frecuencias, el cual permite a un mismo canal de radio ser utilizado simultáneamente en múltiples transmisiones mientras estas se encuentren lo suficientemente separadas para evitar interferencia.

De este modo un rango de frecuencias puede ser utilizado más de una vez en una determinada zona geográfica. Mientras mayor sea la distancia de reuso, será menos la probabilidad de interferencia.



**Figura 1.20.** Reuso de frecuencias

La figura anterior ilustra el concepto de reutilización de frecuencias, donde las células con el mismo número emplean el mismo grupo de canales. La forma hexagonal de

la célula mostrada en la gráfica es conceptual y es un modelo simple de la cobertura de radio para cada radio base, pero ha sido universalmente adoptado dado que el hexágono permite un análisis fácil y manejable de un sistema celular. La cobertura real de una célula se conoce como huella y se determina de los modelos de predicción de la propagación.

Con WCDMA al asignar diferentes códigos únicos a los usuarios, las limitaciones de reuso de frecuencia vistas en FDMA y TDMA ya no son tan críticas, ya que múltiples terminales móviles y radio bases pueden ocupar las mismas frecuencias a la vez. Es obvio entonces que la capacidad en usuarios en WCDMA se incrementa bastante con respecto a las otras dos técnicas de acceso múltiple. Esto se conoce como reuso de frecuencia 1.

### **1.5.8 WCDMA – Tecnología de banda ancha**

Los sistemas inalámbricos pueden ser clasificados de acuerdo a su arquitectura de banda estrecha o banda ancha. Los sistemas de banda estrecha se caracterizan por soportar bajas tasas de transmisión, mientras que los sistemas de banda ancha soportan altas tasas de transmisión. Un sistema se define como de banda ancha o de banda estrecha dependiendo del ancho de banda del canal físico en el cual opera. El ancho de banda de un sistema es evaluado con respecto al ancho de banda de coherencia, el cual se define como la banda de frecuencias en la cual todos los componentes de frecuencia son afectados por el desvanecimiento (*fading*) debido al fenómeno de propagación multitrayectoria.

Los sistemas que trabajan con canales menores que el ancho de banda de coherencia son conocidos como sistemas de banda estrecha, mientras que los sistemas que trabajan con canales sustancialmente mayores que el ancho de banda de coherencia son sistemas de banda ancha.

En sistemas de banda estrecha, todos los componentes de la señal son igualmente influenciados por la propagación multitrayectoria, mientras que en sistemas de banda ancha las diferentes componentes de frecuencia de la señal son afectadas de manera distinta por el *fading*.

El ancho de banda de coherencia,  $B_c$ , depende del entorno y se encuentra dado por la expresión [6]:

$$B_c = \frac{1}{2\pi T} [Hz] \quad (1.1)$$

Donde  $T$ , en segundos es el retardo en la propagación y se define como el tiempo que transcurre desde que arriba al receptor la primera señal y la última señal debido a efectos de multitrayectoria. Este tiempo es mayor en las zonas urbanas que en las rurales. Un valor típico en zonas urbanas del retardo en la propagación es de  $4 \mu s$  y en las zonas rurales un valor de  $1,2 \mu s$  [19].

Con los retardos de propagación mencionados, se obtienen los siguientes valores para el ancho de banda de coherencia:

$$B_c = (2\pi \times 4 \mu s)^{-1} [Hz] \text{ (zona urbana)}$$
$$B_c = 39,79 \text{ kHz}$$

$$B_c = (2\pi \times 1,2 \mu s)^{-1} [Hz] \text{ (zona rural)}$$
$$B_c = 132,63 \text{ kHz}$$

Como se mencionó antes WCDMA emplea 5 MHz de ancho de banda, por lo que se puede afirmar entonces que WCDMA es un sistema de banda ancha.

## 1.6 SISTEMAS MÓVILES UMTS

La integración del equipo de usuario, la tecnología de radio empleada (UTRA) y el núcleo de la Red (CN – *Core Network*) resulta en el sistema 3G conocido como UMTS.

### 1.6.1 Características de UMTS

UMTS permite introducir muchos más usuarios a la red global del sistema, y además permite incrementar la velocidad teóricamente a 2 Mbps por usuario móvil.

Está siendo desarrollado por 3GPP, un proyecto común en el que colaboran: ETSI (Europa), ARIB/TIC (Japón), ANSI T-1 (USA), TTA (Korea), CWTS (China). Para alcanzar la aceptación global, 3GPP va introduciendo UMTS por fases y versiones anuales

UMTS ofrece los siguientes servicios:

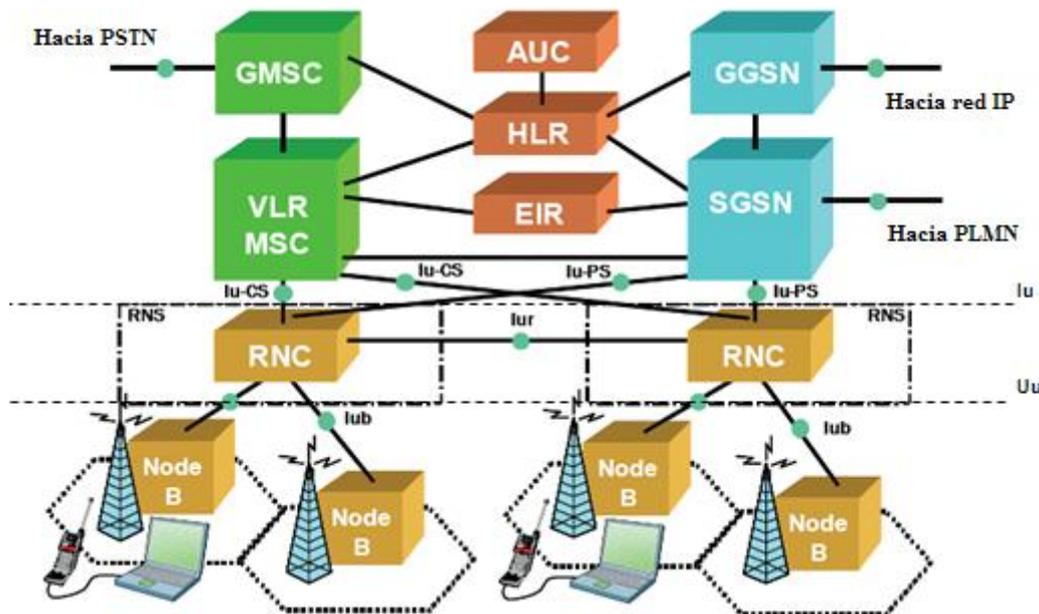
- *Facilidad de uso y bajos costos:* UMTS proporciona servicios de uso fácil y adaptable para abordar las necesidades y preferencias de los usuarios, amplia gama de terminales para realizar un fácil acceso a los distintos servicios y bajo coste de los servicios para asegurar un mercado masivo.
- *Nuevos y mejorados servicios:* Los servicios de voz mantendrán una posición dominante durante varios años. Los usuarios exigirán a UMTS servicios de voz de alta calidad junto con servicios de datos e información. Las proyecciones muestran una base de abonados de servicios multimedia en fuerte crecimiento, lo que posibilita también servicios multimedia de alta calidad en áreas carentes de estas posibilidades en la red fija, como zonas de difícil acceso.
- *Acceso rápido:* La principal ventaja de UMTS sobre la segunda generación móvil (2G), es la capacidad de soportar altas velocidades de transmisión de datos. Esta capacidad sumada al soporte inherente del protocolo de Internet (IP), se combinan poderosamente para prestar servicios multimedia interactivos y nuevas aplicaciones de banda ancha.

### 1.6.2 Arquitectura de la Red UMTS

Se analizará la arquitectura de la red UMTS en concordancia con las especificaciones de IMT-2000. La red UMTS está compuesta por tres bloques básicos [6]:

- Equipo de usuario (UE)
- Red de Acceso de Radio Terrestre UMTS (UTRAN)
- Núcleo de la red (CN)

En la figura 1.21 se puede apreciar cada una de las partes que componen los bloques antes mencionados y las respectivas conexiones entre ellos.



**Figura 1.21.** Arquitectura de la red UMTS [22]

### *Equipo de Usuario (UE.)*

El UE provee el acceso al sistema a cada uno de los usuarios. Este consiste en el equipo móvil (ME) y el módulo UMTS de identidad del suscriptor (USIM).

### *Equipo móvil (ME).*

El equipo móvil es el terminal de radio, mismo que soporta diversas funciones para permitir el acceso al sistema.



**Figura 1.22.** Equipos móviles UMTS

### *Módulo de identidad de suscriptor UMTS (USIM).*

El USIM es la tarjeta inteligente que permite proveer al usuario de servicios y de opciones de seguridad. Este adicionalmente posee la identidad del suscriptor y alguna información adicional del mismo, permite realizar además procesos de autenticación y encriptación.



**Figura 1.23.** USIM

### *Red de Acceso de Radio Terrestre UMTS (UTRAN).*

La UTRAN soporta funciones de comunicación con el ME y el núcleo de la red (CN), además constituye el medio por el cual el ME y el CN intercambian información, actuando como un puente, *router* o *gateway*.

UTRAN consiste en un conjunto de subsistemas de redes de radio (RNS – *Radio Network Subsystem*), cada uno de los cuales contiene un controlador de red de radio (RNC – *Radio Network Controller*) y una o más entidades conocidas como *Nodo B*.

#### *Nodo B*

El *nodo B* es una entidad que soporta frecuencias de radio tanto para transmisión como para recepción y constituye el acceso al sistema de emisión de información. Este realiza codificación de canal y entrelazamiento, adaptación de tasas de transmisión, esparcimiento, operación y gestión de los recursos de radio, control de potencia, entre otras funciones. El *Nodo B* no es sino la estación base. El término *Nodo B* inicialmente fue un nombre provisional adoptado en el proceso de estandarización de UMTS, pero ahora es un nombre permanente. Un *nodo B* puede manejar una o más células, puede adicionalmente combinar o dividir funciones para soportar macro diversidad en sí mismo.

### *Controlador de la Red de Radio (RNC).*

El RNC realiza control de acceso, control de conexión y posicionamiento geográfico, adicionalmente controla los recursos de radio en su dominio, constituyéndose de este modo como el punto de acceso al servicio para todos los servicios que la UTRAN provee al CN. Por tanto el RNC es el Controlador de la Estación Base (BSC – *Base Station Controller*). Un RNC controlando un Nodo B es conocido como CRNC (*controlling RNC*). El CRNC responde por funciones como control de carga y control de congestión de sus células.

### *Núcleo de la Red (CN).*

El CN realiza funciones de comunicación con la UTRAN y con otros CN. Este es el medio que permite soportar la movilidad de usuarios y brindar servicios a los mismos.

Los elementos básicos que constituyen el CN son:

- Centro de Switcheo Móvil/ Registro de Localización de Visitantes (MSC/VLR)
- Registro de Localización de Usuarios Locales (HLR)
- *Gateway* MSC (GMSC)
- Nodo de soporte de servicios GPRS (SGSN)
- *Gateway* para el nodo de soporte de servicios GPRS (GGSN)
- Centro de autenticación (AuC)
- Registro de identidad de los equipos (EIR)
- Interfaces abiertas

### *Centro de Switcheo Móvil/ Registro de Localización de Visitantes (MSC/VLR).*

El MSC realiza las funciones de switcheo, coordina las llamadas y realiza procedimientos de enrutamiento dentro de la red. El VLR es una base de datos que contiene una copia del perfil de servicio de un suscriptor visitante y además información sobre la localización del mismo dentro del sistema. La combinación del MSC con el VLR permite proveer servicios de switcheo de circuitos a los UE.

*Registro de Localización de Usuarios Locales (HLR).*

El HLR es una base de datos que contiene una lista de los suscriptores locales y con los respectivos servicios con los que cuentan cada uno de ellos. El HLR almacena además la información de la localización de los UE con el propósito de encaminar transacciones como llamadas o mensajes cortos (SMS).

*Gateway MSC (GMSC).*

El Gateway MSC realiza control de llamadas, control de conexión y switcheo de servicios. El GMSC se comunica con el HLR para realizar enrutamiento de información. Todas las conexiones sean estas entrantes o salientes que realicen switcheo de circuitos emplean el GMSC.

*Nodo de soporte de servicios GPRS (SGSN).*

El SGSN actúa como una interfaz lógica a la UTRAN, es responsable por el envío de paquetes hacia el correcto Nodo B. Adicionalmente realiza cifrado, autenticación, administración de sesiones, de movilidad y administración lógica del enlace a las estaciones móviles. Las funciones que realiza son similares a las realizadas por el MSC/VLR pero para servicios de paquetes solamente.

*Gateway para el nodo de soporte de servicios GPRS (GGSN).*

El GGSN funciona como la interfaz lógica a la red de paquetes de datos externa (PDN), Para redes IP externas, el GGSN actúa como un router IP ordinario, este además puede incluir un firewall y mecanismos de filtrado de paquetes. Este *gateway* además provee mecanismos para asignar el correcto SGSN acorde a la localización de un determinado UE. Sus funciones son similares al GMSC pero para servicios de paquetes.

Se debe considerar además las conexiones existentes con redes externas las cuales incluyen servicios de switcheo de circuitos como PLMN, PSTN e ISDN y servicios de switcheo de paquetes como el Internet.

#### *Centro de autenticación (AuC).*

El AuC contiene una base de datos que mantiene los datos de cada abonado móvil para permitir la identificación internacional de los mismos (IMSI) para poder realizar la autenticación del abonado y para poder cifrar la comunicación por el camino radio entre la MS y la red. El AuC transmite los datos requeridos para la autenticación y cifrado a través del HLR hasta el VLR, MSC y SGSN que necesitan autenticar al abonado móvil [23].

#### *Registro de identidad de los equipos (EIR).*

El EIR contiene una base de datos que mantiene los identificadores internacionales de equipos móviles (IMEI) para controlar el acceso a la red de los equipos móviles.

#### ***Interfaces abiertas.***

En la arquitectura de una red UMTS se debe definir las diferentes interfaces que existen entre sus elementos. Las principales interfaces abiertas son la interfaz Cu, interfaz Uu, interfaz Iu, interfaz Iur y la interfaz Iub. Las interfaces abiertas permiten a los operadores instalar sus equipos con elementos adquiridos de diferentes fábricas, es decir son un conjunto de protocolos que permiten la comunicación entre dispositivos de la red UMTS.

#### *Interfaz Cu.*

Esta es la interfaz entre la USIM y el ME y está definido en términos de especificaciones físicas, incluyendo tamaño, contactos, especificaciones eléctricas, protocolos y otros. Esta interfaz constituye el formato estándar para tarjetas inteligentes.

### *Interfaz Uu.*

Esta es la interfaz de radio entre el ME y UTRAN utilizando WCDMA.

### *Interfaz Iu.*

Constituye la interfaz entre UTRAN y el CN. Existen dos tipos de interfaz Iu llamadas interfaz de switcheo de circuitos Iu (Iu CS) e interfaz de switcheo de paquetes Iu (Iu PS) las cuales conectan al dominio de switcheo de circuitos y de paquetes de la UTRAN respectivamente. Entre de las funciones de la Iu está reportar transmisiones de datos no satisfactorios, transferencia transparente de mensajes de señalización entre UE y el CN e implementación de cifrado.

### *Interfaz Iur.*

Esta es la interfaz entre los RNCs de diferentes RNSs. Esta establece comunicación entre los RNCs a través de conexiones físicas directas o a través de redes de transporte adecuadas. Iur fue diseñada para soportar *soft handover* entre RNCs.

### *Interfaz Iub.*

Esta es la interfaz entre el Nodo B y RNC. Esta interfaz soporta todos los procedimientos para operaciones lógicas y mantenimiento (O&M) del nodo B. Específicamente entre sus funciones se puede considerar: configuración del primer enlace de radio para un UE, configuración de la célula, inicialización y reporte de parámetros de la célula o del Nodo B, manejo de canales de acceso.

## **CAPÍTULO 2**

### **PARÁMETROS PREVIOS A LA OBTENCIÓN DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DE UNA RED UMTS**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

Un sistema de comunicación digital debe cumplir características como ser capaz de ser un sistema de bajo costo que pueda transmitir información de una fuente hacia el usuario a una tasa y nivel de precisión adecuada, para ello los principales parámetros que deben considerarse son el ancho de banda del canal de transmisión, la potencia de la señal requerida, interferencias, codificación de canal, entre otros. Generalmente, los requerimientos del usuario determinan la tasa de transmisión de información y el nivel de confiabilidad con el cual la información llega a su destino. Los parámetros considerados en este capítulo se obtendrán teniendo siempre en cuenta el concepto de eficiencia espectral el mismo que constituye un factor importante para contrastar diferentes sistemas de radio y modulación.

A la hora de abordar los parámetros técnicos para los sistemas móviles de tercera generación es importante considerar las especificaciones del 3GPP cuyo objetivo es la elaboración de especificaciones del sistema UMTS, pero no de la definición de las normas finales, a cargo de los pertinentes organismos de estandarización, aunque en la práctica las recomendaciones del 3GPP suelen ser adoptadas y normalizadas por dichos organismos.

En este capítulo se obtendrán y analizarán parámetros técnicos necesarios para el cálculo de la eficiencia espectral de los sistemas móviles UMTS tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente.

## 2.2 CODIFICACIÓN DE CANAL

La codificación del canal es un proceso mediante el cual se añade redundancia a los datos generados por la codificación de la fuente, de forma que se detectan e incluso se corrigen algunos errores introducidos por el canal de radio.

### 2.2.1 Códigos Convolucionales

Un código CRC (Códigos de Redundancia Cíclica) acepta un mensaje de  $k$  bits y genera una palabra código de  $n$  bits. Es decir, se debe introducir un bloque completo para generar la secuencia código. Hay aplicaciones sin embargo, donde los bits mensaje entran en serie en lugar de en bloques, por lo que sería necesario el uso de "buffers" de tamaño considerable para almacenar momentáneamente los bloques a codificar.

Un parámetro importante a considerar constituye la tasa de codificación  $r$ , el cual mide la proporción de cada palabra codificada que 'transporta' información.

$$r = \frac{k}{n} \quad (2.1)$$

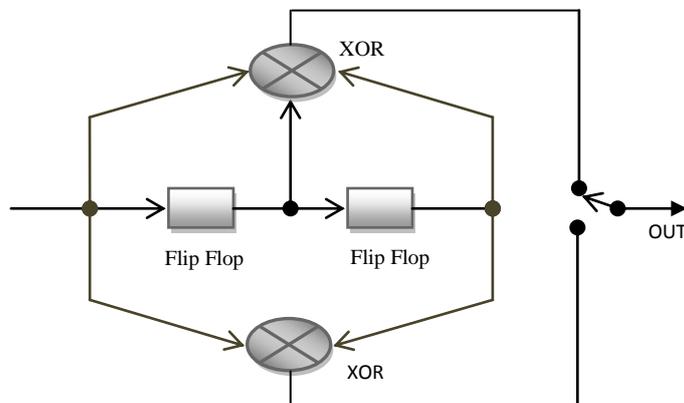
El codificador de un código convolucional binario de razón  $1/n$ , se puede ver como una máquina de estados finitos que consiste en un registro de desplazamiento de  $M$  etapas con conexiones de sumadores (módulo 2), y un multiplexor que convierte en serie la salida de los sumadores. Una secuencia de mensaje de  $L$  bits produce una secuencia de salida codificada de longitud  $n(L + M)$  bits.

La tasa de codificación para codificadores convolucionales viene dada por la expresión [24]:

$$r = \frac{L}{n(L+M)} \quad (2.2)$$

Normalmente, se tiene que  $L \gg M$ . Por lo tanto, la tasa se simplifica como:

$$r \approx \frac{1}{n} \quad (2.3)$$



**Figura 2.1.** Ejemplo de un codificador convolucional de tasa 1/2

Utilizar códigos convolucionales es una manera de proteger a la información libre de errores, estos códigos combinan la codificación de bloque la misma que es utilizada para detectar errores y adicionalmente el esquema ARQ (Petición de Repetición Automática) el cual los corrige.

### 2.2.2 Turbo Códigos

Las prestaciones de un codificador convolucional mejoran al incrementar el tamaño de las memorias (registros), pero no se puede aumentar la memoria indiscriminadamente ya que la complejidad en el proceso de decodificación crece de una manera exponencial, para ello se crearon los turbo códigos, los cuales son esquemas de codificación que aumentan la memoria de codificación de una manera artificial, pues se basan en concatenar esquemas de codificación relativamente simples con el fin de obtener un código equivalente en prestaciones a uno más complejo.

Los Turbo códigos se basan en la concatenación de dos codificadores relativamente sencillos separados por un entrelazado. El conjunto es equivalente a un único codificador convolucional de memoria tan grande como la profundidad de entrelazado pero con un

proceso de decodificación que en ningún caso alcanzaría la complejidad del convolucional equivalente [25].

### 2.2.3 Punctured codes (Códigos perforados)

Cuando en la ecuación 2.1 el valor de  $k$  es igual a 1, los códigos se denominan códigos madre. Se pueden combinar estos códigos madre y generar los denominados *punctured codes*, en los cuales bits que fueron codificados no son transmitidos pero siguiendo un patrón que también es conocido en el receptor pues este coloca bits de relleno para reemplazar a los omitidos y se pueda realizar la decodificación adecuadamente. Este proceso denominado *puncturing* permite incrementar la tasa de transmisión al utilizar menos bits codificados. Esta técnica permite producir códigos con diferentes tasas utilizando un simple hardware y se utilizan como complemento a los códigos convolucionales pues su mayor ventaja es que las tasas de estos códigos pueden cambiar dinámicamente (a través de *software*) dependiendo de las condiciones del canal.

WCDMA emplea los denominados códigos OVSF (*orthogonal variable spreading factor*) los cuales ofrecen factores de ensanchamiento que son múltiplos de 2, siendo de 2 a 512 para el *downlink* y de 2 a 256 para el *uplink*, por tanto no se puede tener factores de ensanchamiento ideales para tasas de transmisión que no sean múltiplos de 2. Es por este motivo que se emplean los códigos perforados en el proceso denominado *rate-matching* a fin de aprovechar su característica de tasas de código variables.

### 2.2.4 Tasas de Código en WCDMA-FDD

La codificación de canal es empleada en los canales de transporte de WCDMA, los esquemas de codificación de canal establecidos en la especificación técnica 3GPP TS 25.212 Versión 4.5.0 son:

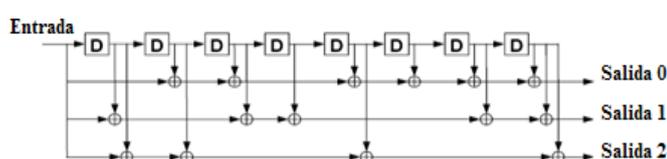
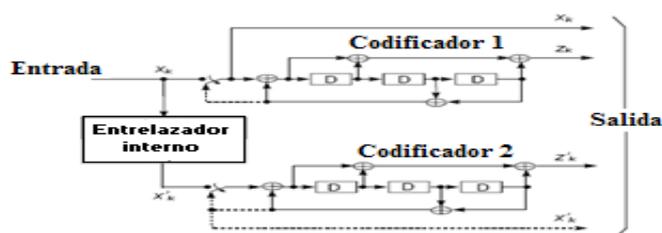
- Códigos convolucionales (Tasa de código  $r = 1/2$ ;  $r = 1/3$ )
- Turbo códigos (Tasa de código  $r = 1/3$ )

En la siguiente tabla se muestra el esquema de codificación y la tasa de código para los diferentes tipos de canales de transporte:

**Tabla 2.1.** Codificación de canal y tasa de código para WCDMA [26]

Tipo de canal de Transporte	Esquema de codificación	Tasa de código $r$
BCH	Códigos Convolucionales	1/2
RACH		1/2, 1/3
CPCH, DCH, DSCH, FACH	Turbo Códigos	1/3

Las figuras a continuación muestran el diagrama de bloques de los esquemas de codificación utilizados en WCDMA-FDD:

**Figura 2.2.** Codificador convolucional de tasa  $r = 1/3$  [26]**Figura 2.3.** Turbo codificador de tasa  $r = 1/3$  [26]

### *Canales de transporte.*

Los canales de transporte son puntos de acceso al servicio (SAP) localizados entre la capa de control de acceso al medio (MAC) y la capa física. Estos canales proveen servicios de transporte de información entre estas dos entidades. Un canal de transporte se caracteriza por como la información se transmite a través de la interfaz de radio y por el tipo de información que este lleva. Estos canales pueden ser agrupados en canales comunes y canales dedicados. Existen canales que son compartidos por todos los UE o por un grupo de ellos, así también existe un canal el mismo que es único para cada uno de los UE [6].

### *Canal de Broadcast (BCH).*

Este es un canal de transporte utilizado en el *downlink* empleado para realizar *broadcast* a todo el sistema con información específica de la célula. Esta información puede ser códigos de acceso randómicos disponibles, tipos de métodos de transmisión empleando diversidad.

### *Canal de Acceso Directo (FACH).*

Es un canal de transporte utilizado en el *downlink*, es empleado para transportar información de control al UE cuya localización es conocida por el sistema. Además este canal transporta paquetes de datos cortos.

### *Canal de Acceso Randómico (RACH).*

El RACH es un canal de transporte utilizado para transportar información de control desde el UE hacia la red, especialmente con propósitos de acceso randómico (peticiones para establecer una conexión). Este además es utilizado para transportar paquetes de datos pequeños desde un UE con mensajes que no duran más de una o dos tramas.

### *Canal Común de Paquetes (CPCH).*

Este canal de transporte es utilizado en UTRA-FDD. Es un canal utilizado en el enlace ascendente el cual transporta paquetes de información pequeños desde el UE. Este canal constituye una extensión del canal RACH, pero este soporta mensajes con más tramas y mecanismos de control de potencia mucho más rápidos.

### *Canal compartido en Downlink (DSCH).*

Es un canal de transporte compartido utilizado en el *downlink* para transportar datos dedicados de los usuarios e información de control para varios usuarios. Este canal es muy parecido a FACH, aunque la principal diferencia es un mejor y más rápido control de potencia.

### Canal Dedicado (DCH).

Este es el único canal de transporte dedicado dentro del grupo. Este es un canal de transporte utilizado en el *uplink* y el *downlink* el mismo que lleva información de los usuarios y además información de control. Este canal se caracteriza pues soporta diferentes tasas de transmisión, multiplexación de servicios y *soft handover*.

## 2.3 GANANCIA DE PROCESAMIENTO

La ganancia de procesamiento constituye un aspecto fundamental en los sistemas WCDMA, pues les da a los sistemas la robustez contra interferencias lo que le permite reutilizar la frecuencia portadora de 5 MHz en distancias geográficamente cercanas. La ganancia de procesamiento se encuentra expresada por la ecuación:

$$G_p = \frac{T_b}{T_c} = \frac{\text{Periodo de bit}}{\text{Periodo de chip}} = \frac{\text{Tasa de chip}}{\text{Tasa de bit}} \quad (2.4)$$

Además se conocía que la tasa de chips empleada en los sistemas WCDMA es de 3,84 Mcps. A continuación se detallan las ganancias de procesamiento para diferentes tasas de transmisión de datos.

**Tabla 2.2.** Ganancias de procesamiento para diferentes tasas de transmisión en WCDMA

	Voz	Datos		
Bit Rate [kbps]	12,2	64	128	384
$G_p$	314,75	60,00	30,00	10,00
$G_p$ [dB]	24,98	17,78	14,77	10,00

## 2.4 BLER (BLOCK ERROR RATIO)

El BLER es la relación entre el número de bloques erróneos recibidos para el número total de bloques transmitidos. Un bloque erróneo es un bloque en el cual el código de redundancia cíclica analizado por el receptor es incorrecto [27].

## 2.5 FACTOR DE ORTOGONALIDAD ( $\alpha$ )

WCDMA se caracteriza por utilizar códigos ortogonales en el *downlink* para separar a los usuarios, y sin ningún tipo de propagación multitrayectoria la ortogonalidad permanece cuando la señal de la estación base es recibida por el dispositivo móvil. Debido a la dispersión multitrayectoria se producen pérdidas en la ortogonalidad entre los códigos empleados para los usuarios. Esta pérdida se determina mediante el denominado factor de ortogonalidad. Un valor de ortogonalidad igual a 1 corresponde a códigos perfectamente ortogonales. Típicamente, la ortogonalidad se encuentra en valores entre 0,4 y 0,9 en canales multitrayectoria [18].

Usualmente se emplea un valor de 0,5 cuando se trabaja con macro células y un valor de 0,9 cuando se manejan micro células.

## 2.6 RELACIÓN SEÑAL A RUIDO ( $E_b/N_0$ )

En sistemas de tipo analógico es común emplear la relación entre la potencia promedio de la señal para la potencia promedio del ruido (S/N o SNR). En comunicaciones digitales por su parte es común emplear el  $E_b/N_0$ , como una versión normalizada de la SNR.  $E_b$  representa la energía de bit y puede ser descrita como la potencia de la Señal (S) por el tiempo de bit ( $T_b$ ).  $N_0$  es la densidad espectral de ruido, y puede ser descrita como la potencia del ruido (N) dividida para el ancho de banda.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S T_b}{N/W} \quad (2.5)$$

Debido a que el tiempo de bit y la tasa de bit ( $R_b$ ) son parámetros inversos [28]:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S/R_b}{N/W} = \frac{S W}{N R_b} \quad (2.6)$$

El parámetro  $E_b/N_0$ , es una medida estándar de la calidad para el desempeño de sistemas de comunicaciones digitales. El  $E_b/N_0$ , requerido puede ser considerado como

una métrica que permite comparar el desempeño de un sistema con otro; cuando un sistema requiere la menor cantidad de  $E_b/N_0$ , entonces existe mayor eficiencia en el proceso de detección para una probabilidad de error dada. El  $E_b/N_0$  es una medida adimensional comúnmente expresada en dB.

Para el análisis en el presente estudio se considerará no únicamente la potencia del ruido como se lo hace en el parámetro  $E_b/N_0$ , sino que además se tendrá en cuenta la interferencia que proviene de la célula de interés y de células adyacentes, motivo por el cual se empleará el la relación señal a interferencia más ruido a la que se denotará como  $\gamma_b$ .

### 2.6.1 Requerimientos de desempeño para el enlace ascendente

*Canales de Transporte considerados para la establecer los valores de  $\gamma_b$  en el uplink.*

Antes de establecer los requerimientos de desempeño para el enlace ascendente (*uplink*) debemos definir algunos canales de transporte, físicos y lógicos [6].

*DPDCH.*

El Canal de Datos Físico Dedicado (*Dedicated Physical Data Channel*) es un canal empleado para transportar información de usuario tanto en el *uplink* como en el *downlink*.

*DPCCH.*

El Canal de Control Físico Dedicado (*Dedicated Physical Control Channel*) es un canal empleado para transportar información de control tanto en el *uplink* como en el *downlink*.

*DTCH.*

El Canal de Tráfico Dedicado es un canal empleado en conexiones punto – punto el cual puede aparecer tanto en el enlace de subida como en el de bajada y es utilizado para transportar información a un solo UE.

### Valores de $\gamma_b$ según las especificaciones 3GPP.

A continuación consideraremos los valores mínimos de  $\gamma_b$  requeridos para un adecuado enlace de subida, estos valores se toman a partir de una la especificaciones técnicas de la 3GPP, específicamente la 3GPP TS 25.104.

Los valores de  $\gamma_b$  establecidos posteriormente se definen como [29]:

$$\gamma_b = \frac{E_c L_{chip}}{N_o L_{inf}} \quad (2.7)$$

Donde:

$E_c$  → Energía total recibida de los canales DPDCH y DPCCH por cada chip de las secuencias de pseudoruido provenientes de todas las trayectorias.

$N_o$  → Densidad espectral de potencia de ruido proveniente de todas las fuentes de ruido, incluye interferencias.

$L_{chip}$  → Número de chips por trama.

$L_{inf}$  → Es el número de bits de información en el DTCH sin considerar los bits empleados en códigos de redundancia cíclica (CRC) en la trama.

Al hablar de enlace ascendente se considera que los valores de  $\gamma_b$  requeridos sean para la estación base, además estos requerimientos se establecen en función del BLER para el canal DCH, la especificación técnica de la 3GPP considera los apropiados los valores en la tabla a continuación para los siguientes casos:

**Tabla 2.3.** Valores de BLER requerido para el enlace ascendente [29]

Canal Físico	Tasa de transmisión	Propagación Estática	Propagación Multi-trayectoria
DCH		Métrica de desempeño	
	12,2 kbps	$BLER < 10^{-2}$	$BLER < 10^{-2}$
	64 kbps	$BLER < 10^{-1}, 10^{-2}$	$BLER < 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$
	128 kbps	$BLER < 10^{-1}, 10^{-2}$	$BLER < 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$
	384 kbps	$BLER < 10^{-1}, 10^{-2}$	$BLER < 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$

*Requerimientos de desempeño para propagación estática.*

Los requerimientos de desempeño de DCH en condiciones de propagación estática se encuentra determinado por el máximo BLER permitido cuando la señal de entrada en el receptor tiene un valor límite de  $\gamma_b$  establecido.

El BLER no debe exceder el límite para el  $\gamma_b$  especificado en la tabla a continuación.

**Tabla 2.4.** Valores de  $\gamma_b$  requeridos para propagación estática en el *uplink* [29]

Tasa de transmisión	$\gamma_b$ [dB] (3GPP)	BLER requerido
12,2 kbps	No determinado	$< 10^{-1}$
	5,1	$< 10^{-2}$
64 kbps	1,5	$< 10^{-1}$
	1,7	$< 10^{-2}$
128 kbps	0,8	$< 10^{-1}$
	0,9	$< 10^{-2}$
384 kbps	0,9	$< 10^{-1}$
	1	$< 10^{-2}$

Es importante mencionar que las especificaciones técnicas de la 3GPP consideran señalización constante empleando el canal DCCH (*Dedicated Control Channel* – Canal Lógico). El DCCH es un canal bidireccional punto – punto que es empleado para transportar información de control entre la red y el UE cuando una conexión RRC (*Radio Resource Control*) se establece, como por ejemplo envío de información del sistema en *broadcast* o control de potencia. El empleo de señalización constante produce una sobrecarga en el canal DCCH, esta sobrecarga se puede evitar considerando que el canal únicamente se encuentra activo cuando algún tipo de señalización es requerido. Ésta señalización se realiza transmitiendo 100 bits cada 40 milisegundos, por tanto la sobrecarga del Canal de Control Dedicado se define mediante la siguiente expresión [18]:

$$DCCH_{over\ head} = 10 \log \left( \frac{b+100\ bits}{b} \right) \quad (2.8)$$

Donde  $b$  son los bits del usuario transmitidos en 40 ms.

Por tanto el  $\gamma_b$  requerido para propagación estática en el *downlink* sin sobrecarga de DCCH se muestra en la tabla a continuación:

**Tabla 2. 5.** Valores de  $\gamma_b$  requeridos para propagación estática en el *uplink* sin sobrecarga del canal DCCH

Tasa de transmisión	$\gamma_b$ [dB] (3GPP)	DCCH <sub>overhead</sub> [dB]	$\gamma_b$ [dB] sin DCCH overhead
12,2 kbps	No determinado	-0,8	No determinado
	5,1	-0,8	4,3
64 kbps	1,5	-0,2	1,3
	1,7	-0,2	1,5
128 kbps	0,8	-0,1	0,7
	0,9	-0,1	0,8
384 kbps	0,9	-0,03	0,87
	1	-0,03	0,97

*Requerimientos de desempeño para propagación multi-trayectoria.*

Los requerimientos de desempeño de DCH en condiciones de propagación multitrayectoria de igual manera que en propagación estática, se encuentra determinados por el máximo BLER permitido cuando la señal de entrada en el receptor tiene un valor límite de  $\gamma_b$  establecido.

El BLER no debe exceder el límite para el  $\gamma_b$  especificado en la siguiente tabla:

**Tabla 2.6.** Valores de  $\gamma_b$  requeridos para propagación multitrayectoria en el *uplink* [29]

Tasa de transmisión	$\gamma_b$ [dB] (3GPP)	BLER requerido	$\gamma_b$ [dB] sin DCCH overhead
12,2 kbps	No determinado	$< 10^{-1}$	No determinado
	7,2	$< 10^{-2}$	6,4
	8,0	$< 10^{-3}$	7,2
64 kbps	3,4	$< 10^{-1}$	3,2
	3,8	$< 10^{-2}$	3,6
	4,1	$< 10^{-3}$	3,9
128 kbps	2,8	$< 10^{-1}$	2,7
	3,2	$< 10^{-2}$	3,1
	3,6	$< 10^{-3}$	3,5
384 kbps	3,2	$< 10^{-1}$	3,17
	3,6	$< 10^{-2}$	3,57
	4,2	$< 10^{-3}$	4,17

## 2.6.2 Requerimientos de desempeño para el enlace descendente

### *Parámetros para la establecer los valores del $\gamma_b$ en el downlink.*

Las características de recepción del Canal Dedicado (DCH) en un ambiente estático son determinadas por el BLER, el cual es específico para cada tasa de transmisión individual del DCH. DCH es mapeado dentro del Canal Físico Dedicado (DPCH) [6].

#### *DPCH.*

El Canal Físico Dedicado como su nombre lo indica es un canal físico empleado en enlaces ascendentes o descendentes para transportar información del usuario o información de control.

#### *Parámetro $DPCH_{Ec}/I_{or}$ .*

Es la relación que existe entre la energía transmitida por chip de pseudo ruido del DPCH (Potencia de transmisión requerida para una conexión de voz) para la densidad espectral de potencia total en la antena del Nodo B (Potencia total de la estación base).

#### *Parámetro $I_{oc}$ .*

Constituye la densidad espectral de potencia (integrada en un ancho de banda del ruido igual a la tasa de chip y normalizada a la misma) de una fuente de ruido blanco limitada en ancho de banda (simulando interferencia proveniente de otras células) y que es medida en la antena del UE. En otras palabras es la interferencia proveniente de otras células incluyendo ruido blanco.

#### *Parámetro $\widehat{I}_{or}$ .*

Es la densidad espectral de potencia (Potencia de transmisión) de la señal del *downlink*, la cual es recibida en la antena del UE.

**Requerimientos de desempeño para propagación estática.**

A continuación se detallan los valores de los parámetros antes mencionados según la especificación técnica 3GPP TS 25.101.

**Tabla 2.7.** Parámetros de requerimiento de desempeño para propagación estática en el *downlink* [30]

Parámetro	Unidad	Tasa de transmisión							
		12.2 kbps		64 kbps		128 kbps		384 kbps	
$\widehat{I}_{or}/I_{oc}$	dB	-1		-1		-1		-1	
BLER		$10^{-2}$		$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^{-2}$
DPCH_Ec/I <sub>or</sub>	dB	-16,6	-13,1	-12,8	-9,9	-9,8	-5,6	-5,5	

En la tabla 2.7 la relación  $\widehat{I}_{or}/I_{oc}$  es conocida también como *Factor de geometría* (G). Un alto valor de G se obtiene cuando el dispositivo móvil se encuentra cerca de la estación base y un valor bajo, típicamente -3 dB cuando el dispositivo se encuentra en el borde de la célula.

**Requerimientos de desempeño para propagación multi-trayectoria.**

A continuación se detallan los valores de los parámetros utilizados para propagación multi-trayectoria especificados en 3GPP TS 25.101.

**Tabla 2.8.** Parámetros de requerimiento de desempeño para propagación multitrayectoria en el *downlink* [30]

Parámetro	Unidad	Tasa de transmisión									
		12,2 kbps		64 kbps		128 kbps		384 kbps			
$\widehat{I}_{or}/I_{oc}$	dB	-3		-3		3		6			
BLER		$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$
DPCH_Ec/I <sub>or</sub>	dB	-11,8	-8,1	-7,4	-6,8	-9,0	-8,5	-8,0	-5,9	-5,1	-4,4

### Cálculo de valores de $\gamma_b$ para el *downlink*.

Para el enlace descendente se obtiene los valores de  $\gamma_b$  en función de los parámetros de desempeño especificados en la sección anterior, mediante la siguiente expresión [18]:

$$\gamma_b = 10 \log_{10} \left( \frac{\frac{\text{Chip rate } E_c}{\text{Bit rate } I_{or}}}{1 - \text{ortogonalidad} + \frac{1}{\widehat{I_{or}/I_{oc}}}} \right) \quad (2.9)$$

A fin de obtener los valores de  $\gamma_b$  para el *downlink* tanto para propagación estática como para multitrayectoria, se considerará un BLER de  $10^{-2}$ .

Tabla 2.9. Valores de  $\gamma_b$  para el *downlink* en propagación estática [30]

	Voz	Datos		
Bit Rate [kbps]	12,2	64	128	384
DPCH_Ec/I <sub>or</sub> [dB]	-16,6	-12,8	-9,8	-5,5
$\widehat{I_{or}/I_{oc}}$ [dB]	-1	-1	-1	-1
$\gamma_b$ [dB]	7,380	3,982	3,971	3,500
$\gamma_b$ [dB] sin DCCH overhead	<b>6,58</b>	<b>3,782</b>	<b>3,871</b>	<b>3,47</b>

Tabla 2.10. Valores de  $\gamma_b$  para el *downlink* en propagación multitrayectoria [30]

	Voz	Datos		
Bit Rate [kbps]	12,2	64	128	384
DPCH_Ec/I <sub>or</sub> [dB]	-11,8	-7,4	-8,5	-5,1
$\widehat{I_{or}/I_{oc}}$ [dB]	-3	-3	3	6
$\gamma_b$ [dB]	9,209	6,410	6,266	6,143
$\gamma_b$ [dB] sin DCCH overhead	<b>8,408</b>	<b>6,210</b>	<b>6,166</b>	<b>6,113</b>

## 2.7 FACTOR DE ACTIVIDAD ( $\nu$ )

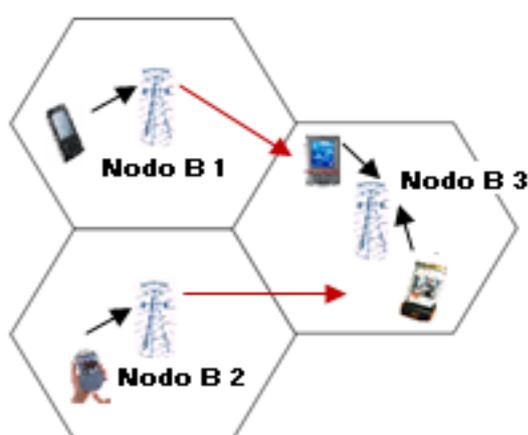
El factor de actividad puede definirse como el porcentaje de tiempo en el cual la voz es transportada en una dirección dada de una llamada. Por ejemplo, durante conversación full-dúplex establecida en una llamada de voz una parte está hablando mientras la otra está

escuchando, en este caso podríamos decir que el factor de actividad de voz es aproximadamente 50%.

Un valor típico de factor de actividad total para voz se asume de 0,67 para el *uplink* y 0,58 para el *downlink* considerando adicionalmente sobrecarga de DPCCH [18], es decir este canal se encuentra en constante utilización cuando utiliza control de potencia en cada uno de los canales DCH, esto implica que DPCCH contribuye con parte del total de la potencia de DCH durante los periodos de actividad de voz. El factor de actividad total para un usuario se encuentra en el rango de 0 a 1.

## 2.8 POTENCIA RECIBIDA POR UN USUARIO CONSIDERANDO INTERFERENCIA DE OTRAS CÉLULAS

En los sistemas celulares WCDMA se emplea enlaces ascendentes y descendentes separados, células adyacentes que utilizan la misma frecuencia y cada estación base controla la potencia de las señales transmitidas y la potencia de las señales transmitidas por los usuarios dentro de su célula. Sin embargo, una estación base no puede controlar la potencia de las estaciones base de células adyacentes, ni la potencia de los usuarios en dichas células. Estas estaciones y usuarios generan ruido y disminuyen la capacidad de los enlaces ascendente y descendente de la célula de interés [31].



**Figura 2.4.** Interferencia producida por estaciones base de otras células

Existe una métrica para determinar los efectos producidos por estas interferencias, al que denominaremos factor  $i$  que es la relación de la potencia de otras células para la potencia de la propia célula que recibe un usuario.

Los valores promedio recomendados para el factor  $i$  son los siguientes [18]:

- 55% cuando se trabaje con antenas omnidireccionales en macro células.
- 65% cuando se utilice macro células con 3 sectores.
- En micro células el valor promedio empleado para el factor  $i$  es de 40%.

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS DE EFICIENCIA ESPECTRAL PARA UN SISTEMA UMTS

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

El término “eficiencia” se refiere al grado en que los medios empleados en un proceso son aprovechados para obtener de ellos el mayor rendimiento posible. Considerando que las radiocomunicaciones han mostrado su enorme valor para desarrollar nuevas modalidades de servicios y han ayudado en la implantación de escenarios de competitividad entre operadores de telecomunicaciones, se ha comprendido la importancia de analizar la eficiencia con la cual los sistemas implementados por dichos operadores aprovechan el espectro radioeléctrico para proveer diferentes servicios.

Analizar la eficiencia espectral de un sistema de telecomunicaciones constituye un factor importante, pues permite determinar la capacidad de dicho sistema y adicionalmente ayuda a desarrollar técnicas que ayuden a mejorar el desempeño del mismo. Estudiar la eficiencia espectral en WCDMA básicamente es determinar el número de usuarios que pueden acceder simultáneamente a los canales del sistema aprovechando al máximo la capacidad que posee esta tecnología al utilizar un reuso de frecuencias igual a 1.

El presente capítulo no únicamente analiza la eficiencia espectral sino que además propone mecanismos para mejorar el *performance* de WCDMA que como ya se ha mencionado es la tecnología empleada en la interfaz de radio de UMTS.

En las secciones a continuación se determinará adicionalmente el *throughput* que se puede manejar en una célula con lo que se busca determinar la cantidad de información que fluye a través del mismo cuando los usuarios emplean un determinado servicio, dicho

*throughput* se relacionará con las pérdidas que se producen en la interfaz aérea con lo que se busca dar una medida que pretenda evaluar la cobertura de la célula.

Finalmente se determinará el tráfico que se maneja en una célula de WCDMA utilizando herramientas estadísticas como el modelo Erlang B y se considerarán además casos de bloqueo mediante los cuales podremos establecer el número de usuarios que pueden estar dentro de la célula asumiendo un tráfico medio para cada uno de ellos.

### **3.2 EFICIENCIA ESPECTRAL DE WCDMA**

La eficiencia espectral de la interfaz de radio de los sistemas UMTS, es decir WCDMA, puede definirse por el número de comunicaciones simultáneas con una determinada tasa de transmisión o por el *throughput* soportado en cada célula en los 5 MHz de ancho de banda disponible para este tipo de tecnología. Se debe considerar que la eficiencia espectral de los sistemas WCDMA se determina en función del entorno de radio, las condiciones de propagación, los servicios ofrecidos, la movilidad de los usuarios y localización de los mismos, y la calidad de servicio.

La eficiencia espectral teórica de una célula WCDMA puede expresarse mediante las ecuaciones de carga cuyo análisis se realiza a continuación.

#### **3.2.1 Factor de Carga**

Un factor importante a considerar en el dimensionamiento de una red UMTS constituye el número de usuarios y la cantidad de tráfico que ésta puede soportar por cada estación base y estos parámetros se pueden obtener a través del denominado factor de carga. Cuando el reuso de frecuencia de un sistema WCDMA es igual a 1, entonces se dice que el sistema es típicamente limitado por la interferencia y que dicha interferencia y la capacidad de la célula deben ser estimadas.

***Factor de carga para el enlace ascendente (Uplink).***

En primer lugar definimos el  $\gamma_b$ , que como se mencionó anteriormente constituye la relación entre la potencia de la señal para la interferencia más ruido [18].

$$(\gamma_b)_j = Gp_j \frac{\text{Señal del usuario } j}{\text{Potencia recibida total (sin propia señal)}} \quad (3.1)$$

La ecuación anterior puede ser escrita de la siguiente manera [18]:

$$(\gamma_b)_j = \frac{W}{v_j R_j} \frac{P_j}{(I_{total} - P_j)} \quad (3.2)$$

Donde  $W$  es la tasa de chip,  $P_j$  es la señal de potencia recibida de cada usuario  $j$ ,  $v_j$  es el factor de actividad del usuario  $j$ ,  $R_j$  es la tasa de bit del usuario  $j$ , e  $I_{total}$  es la potencia de banda ancha recibida incluyendo la potencia del ruido térmico en la estación base.

Despejando  $P_j$  se tiene:

$$P_j = \frac{1}{1 + \frac{W}{(\gamma_b)_j v_j R_j}} I_{total} \quad (3.3)$$

Definimos que  $P_j = L_j I_{total}$  [18] y obtenemos el factor de carga  $L_j$  para una conexión (un usuario):

$$L_j = \frac{1}{1 + \frac{W}{(\gamma_b)_j v_j R_j}} \quad (3.4)$$

La interferencia total recibida, excluyendo la potencia de ruido térmico  $P_N$ , pueden ser escritos como la suma de la potencia recibida de todos los  $N$  usuarios en la misma célula [18].

$$I_{total} - P_N = \sum_{j=1}^N P_j = \sum_{j=1}^N L_j I_{total} \quad (3.5)$$

El ruido ascendente ( $\rho$ ) se define como la relación de la potencia de ancho de banda total recibida para la potencia del ruido, este parámetro también se conoce como margen de interferencia [18].

$$\rho = \frac{I_{total}}{P_N} \quad (3.6)$$

De la ecuación 3.5 y 3.6 se tiene que:

$$\rho = \frac{I_{total}}{P_N} = \frac{1}{1 - \sum_{j=1}^N L_j} = \frac{1}{1 - n_{UL}} \quad (3.7)$$

Definiendo el factor de carga como  $n_{UL}$  en la expresión:

$$n_{UL} = \sum_{j=1}^N L_j \quad (3.8)$$

Si  $n_{UL}$  tiende a 1, el correspondiente ruido ascendente se aproxima a infinito y el sistema ha alcanzado su capacidad límite.

Adicionalmente, en el factor de carga la interferencia proveniente de otras células es considerada por la relación:

$$i = \frac{\text{interferencia de otras células}}{\text{interferencia de la misma célula}} \quad (3.9)$$

El factor de carga en el enlace ascendente puede ser escrito como [18]:

$$n_{UL} = (1 + i) \sum_{j=1}^N L_j \quad (3.10)$$

$$n_{UL} = (1 + i) \sum_{j=1}^N \frac{1}{1 + \frac{W}{(\gamma_b)_j R_j v_j}} \quad (3.11)$$

La ecuación de carga predice la cantidad de ruido ascendente por encima del ruido térmico debido a la interferencia. El ruido ascendente para el *uplink* es igual a:

$$\rho_{UL} = -10 \log_{10}(1 - n_{UL}) [dB] \quad (3.12)$$

La ecuación de carga es comúnmente utilizada para realizar una predicción del promedio de capacidad de una célula de WCDMA, sin entrar en el sistema a nivel de simulación de la capacidad. Esta ecuación de carga puede ser utilizada para el propósito de predecir la eficiencia espectral del sistema, la capacidad de la célula y planear el ruido ascendente en los procesos de dimensionamiento.

**Tabla 3.1.** Parámetros empleados en el cálculo del factor de carga (*uplink*) [18]

Parámetro	Definiciones	Valores Recomendados
$N$	Número de usuarios por célula	
$v_j$	Factor de actividad del usuario $j$ en la capa física	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,67 para voz, asumiendo 50% de actividad de voz y sobrecarga de DPCCH (Canal de Control Físico Dedicado)</li> <li>• 1 para datos</li> </ul>
$\gamma_b$	Energía de la Señal por bit dividida para la densidad espectral de ruido e interferencias que es requerida para mantener un determinado BLER.	Depende del servicio, tasa de bits, multitrayectoria, velocidad del dispositivo móvil.
$W$	Tasa de chip de WCDMA	3,84 Mcps
$R_j$	Tasa de bit del usuario $j$	Depende del servicio
$i$	Relación entre la interferencia de otras células y la de la propia célula visto por el receptor de la estación base.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macro células con antenas omnidireccionales: 55%</li> <li>• Macro células con 3 sectores: 65%</li> <li>• Micro células: 40%</li> </ul>

### ***Factor de carga en el enlace descendente (Downlink)***

El factor de carga en el enlace descendente  $n_{DL}$ , puede ser definido basado en el mismo principio que para el enlace ascendente, aunque los parámetros son algo diferentes [18]:

$$n_{DL} = \sum_{j=1}^N v_j \frac{(\gamma_b)_j}{R_j} [(1 - \alpha_j) + i_j] \quad (3.13)$$

Donde  $-10 \log_{10}(1 - n_{DL})$  [dB] es igual al ruido ascendente sobre el ruido térmico debido a la interferencia por acceso múltiple para el *downlink* ( $\rho_{DL}$ ).

Comparado con la ecuación de carga para el enlace ascendente, el parámetro más importante constituye  $\alpha_j$ , el cual representa el factor de ortogonalidad, en el *downlink* WCDMA emplea códigos ortogonales para separar los diferentes usuarios, y sin ninguna propagación multitrayectoria la ortogonalidad permanece cuando la señal de la estación base es recibida por la estación móvil.

En el *downlink*, la relación de la interferencia entre otras células y la misma célula,  $i$  depende de la localización del usuario y por tanto será distinto para cada uno de ellos. El factor de carga por tanto puede ser aproximado por su valor promedio, tal como se muestran en la ecuación 3.14 [18].

$$\overline{n_{DL}} = \sum_{j=1}^N v_j \frac{(\gamma_b)_j}{R_j} [(1 - \bar{\alpha}) + \bar{i}] \quad (3.14)$$

**Tabla 3.2.** Parámetros empleados en el cálculo del factor de carga (*downlink*) [18]

Parámetro	Definiciones	Valores Recomendados para Dimensionamiento
$N$	Número de usuarios por célula	
$v_j$	Factor de actividad del usuario $j$ en la capa física.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,58 para voz, asumiendo 50% de actividad de voz y sobrecarga de DPCCH</li> <li>• 1 para datos</li> </ul>
$\gamma_b$	Energía de la Señal por bit dividida para la densidad espectral de ruido e interferencias que es requerida para mantener un determinado BLER.	Depende del servicio, tasa de bits, multitrayectoria, velocidad del dispositivo móvil.
$W$	Tasa de chip de WCDMA	3,84 Mcps
$R_j$	Tasa de bit del usuario $j$	Depende del servicio
$\alpha_j$	Ortogonalidad del canal del usuario $j$	Depende de la propagación multitrayectoria
$i_j$	Relación de la potencia de otras células con la célula de la misma estación base, recibida por el usuario $j$ .	Cada usuario tiene valor distinto de $i_j$ , dependiendo de su localización en la célula.
$\bar{\alpha}$	Promedio del factor de ortogonalidad en la célula	ITU Canal vehicular o macro células: ~50% ITU Canal peatón o micro células: ~90%
$\bar{i}$	Relación promedio de la potencia de otras células con la potencia de la misma célula recibida por el usuario. Interferencia de la misma célula es considerada.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macro células con antenas omnidireccionales: 55%</li> <li>• Macro células con 3 sectores: 65%</li> <li>• Micro células: 40%</li> </ul>

### 3.2.2 Cálculo de canales simultáneos en una célula

Para determinar el número de usuarios simultáneos por cada celda partiremos de la expresiones derivadas para el factor de carga, el análisis se lo realizará considerando la capacidad máxima del sistema, es decir cuando el factor de carga es igual a 1, además de un BLER del 1% para todos los casos y además se considerará que todos los usuarios dentro de la célula utilizan el mismo tipo de servicio a una misma tasa de transmisión y se encuentran uniformemente distribuidos en el área de cobertura de la célula. Los resultados se obtienen para el *uplink* y para el *downlink*, trabajando en ambientes de macro y micro células.

Dado que todos los usuarios emplean la misma tasa de transmisión y se considera las mismas condiciones para cada uno de ellos, la sumatorias presentes en las ecuaciones de carga se transforman en un producto quedando de la siguiente manera:

$$\text{Para el } \textit{downlink}: \quad \overline{n_{DL}} = N v_j \frac{(\gamma_b)_j}{R_j} [(1 - \bar{\alpha}) + \bar{i}] \quad (3.15)$$

$$\text{Para el } \textit{uplink}: \quad n_{UL} = (1 + i) \frac{N}{1 + \frac{W}{(\gamma_b)_j R_j v_j}} \quad (3.16)$$

De las ecuaciones 3.15 y 3.16 se despeja el número de usuarios ( $N$ ) y los resultados obtenidos se muestran en las tablas a continuación en las cuales los valores considerados son para un ambiente con macro células.

**Tabla 3.3.** Número de usuarios (*Macro células - Downlink – Propagación Estática*)

	<b>Voz</b>	<b>Datos</b>			
$\gamma_b$ [dB]	6,58	3,782	3,871	3,47	5
$v_j$	0,58	1	1	1	1
$W$ [Mcps]	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84
$R_j$ [kbps]	<b>12,2</b>	<b>64</b>	<b>128</b>	<b>384</b>	<b>1200</b>
$\bar{i}$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
$\bar{\alpha}$	1	1	1	1	1
$\overline{n_{DL}}$ - Un usuario	$5,45 \times 10^{-3}$	$2,59 \times 10^{-2}$	$5,28 \times 10^{-2}$	$1,45 \times 10^{-1}$	$6,42 \times 10^{-1}$
<b>Número de usuarios (CANALES simultáneos)</b>	<b>183</b>	<b>39</b>	<b>19</b>	<b>7</b>	<b>2</b>

**Tabla 3.4.** Número de usuarios (*Macro Células - Downlink – Propagación Multitrayectoria*)

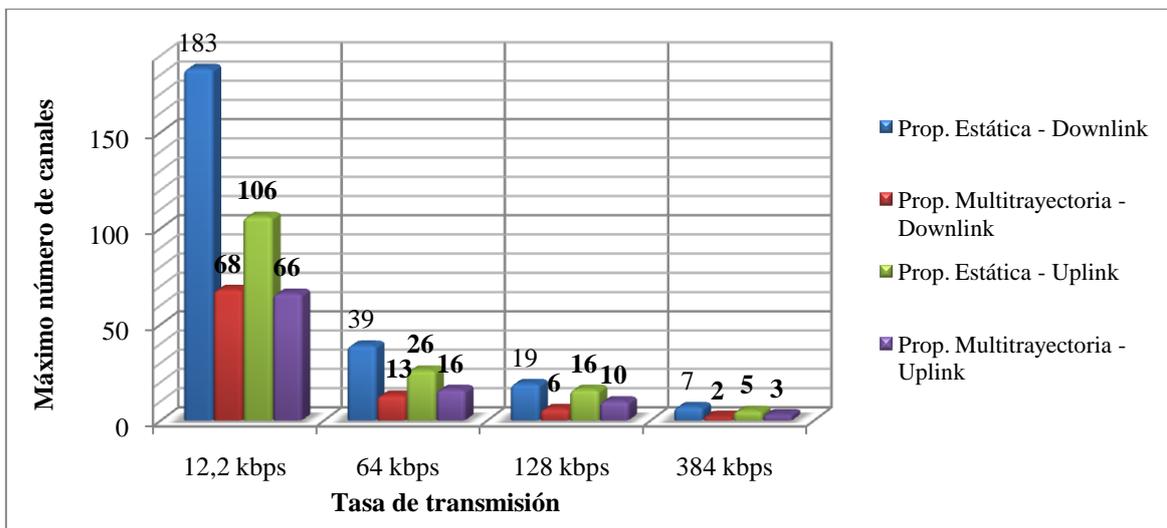
	<b>Voz</b>	<b>Datos</b>			
$\gamma_b$ [dB]	8,408	6,201	6,166	6,113	5
$v_j$	0,58	1	1	1	1
W [Mcps]	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84
$R_j$ [kbps]	<b>12,2</b>	<b>64</b>	<b>128</b>	<b>384</b>	<b>1200</b>
$\bar{i}$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
$\bar{\alpha}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$\overline{n_{DL}}$ - Un usuario	$1,47 \times 10^{-2}$	$7,99 \times 10^{-2}$	$1,59 \times 10^{-1}$	$4,70 \times 10^{-1}$	1,14
<b>Número de usuarios (CANALES simultáneos)</b>	<b>68</b>	<b>13</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>1</b>

**Tabla 3.5.** Número de usuarios (*Macro células - Uplink – Propagación Estática*)

	<b>Voz</b>	<b>Datos</b>			
$\gamma_b$ [dB]	4,3	1,5	0,8	0,97	1,5
$v_j$	0,67	1	1	1	1
W [Mcps]	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84
$R_j$ [kbps]	<b>12,2</b>	<b>64</b>	<b>128</b>	<b>384</b>	<b>1200</b>
$\bar{i}$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
$\overline{n_{DL}}$ - Un usuario	$9,40 \times 10^{-3}$	$3,80 \times 10^{-2}$	$6,36 \times 10^{-2}$	$1,83 \times 10^{-1}$	$5,05 \times 10^{-1}$
<b>Número de usuarios (CANALES simultáneos)</b>	<b>106</b>	<b>26</b>	<b>16</b>	<b>5</b>	<b>2</b>

**Tabla 3.6.** Número de usuarios (*Macro células - Uplink – Propagación Multitrayectoria*)

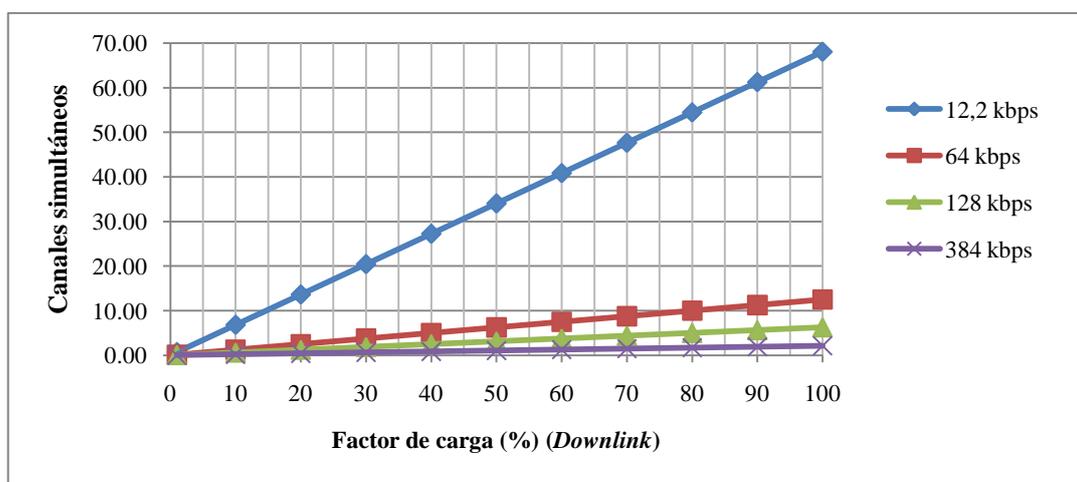
	<b>Voz</b>	<b>Datos</b>			
$\gamma_b$ [dB]	6,4	3,6	3,1	3,57	3
$v_j$	0,67	1	1	1	1
W [Mcps]	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84
$R_j$ [kbps]	<b>12,2</b>	<b>64</b>	<b>128</b>	<b>384</b>	<b>1200</b>
$\bar{i}$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
$\overline{n_{DL}}$ - Un usuario	$1,52 \times 10^{-2}$	$6,07 \times 10^{-2}$	$1,05 \times 10^{-1}$	$3,06 \times 10^{-1}$	$6,34 \times 10^{-1}$
<b>Número de usuarios (CANALES simultáneos)</b>	<b>66</b>	<b>16</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>2</b>



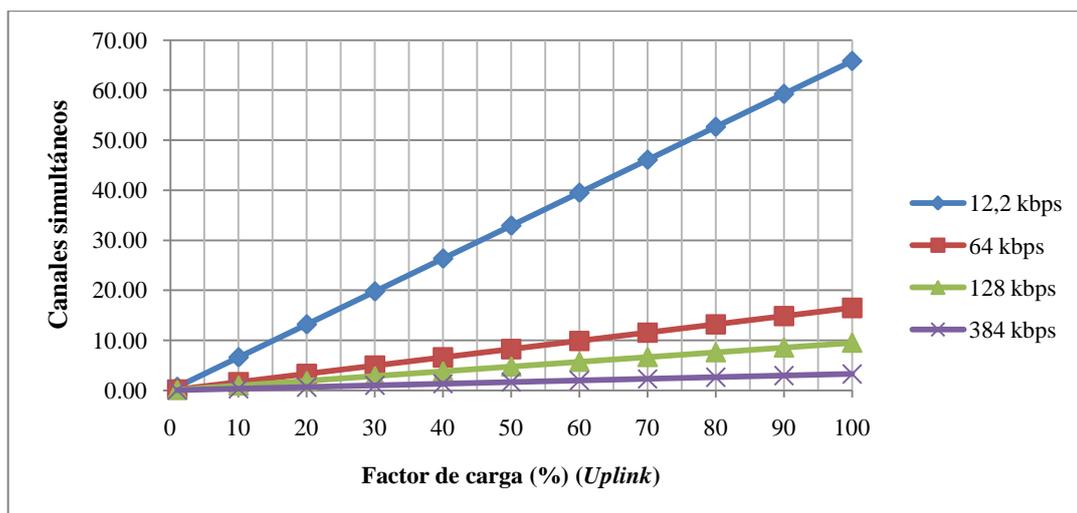
**Figura 3.1.** Máximo número de canales simultáneos para diferentes tasas de transmisión bajo un ambiente de Macro células

Se puede apreciar en la figura 3.1 que el número de canales disponibles está relacionado directamente con la tasa de transmisión empleada por cada uno de los usuarios, además se puede observar claramente la disminución del número de usuarios simultáneos en propagación multitrayectoria, esto debido a los efectos negativos que se producen sobre la ortogonalidad de las señales empleadas en el *downlink*.

En las figuras 3.2 y 3.3 se puede observar el número máximo de canales simultáneos en función del factor de carga, se puede apreciar adicionalmente la relación lineal entre estos dos parámetros cuando todos los usuarios emplean una misma tasa de transmisión.



**Figura 3.2.** Número de canales simultáneos en función del factor de carga *Downlink* (Macro células - Propagación multitrayectoria)



**Figura 3.3.** Número de canales simultáneos en función del factor de carga Uplink (Macro células - Propagación multitrayectoria)

Cuando se trabaja en un ambiente en el cual se emplean micro células la interferencia proveniente de otras células disminuye y por consiguiente el valor de  $\bar{i}$  también lo hace lo que permite incrementar considerablemente el número de usuarios, en las tablas a continuación se muestran los resultados obtenidos cuando se trabaja con este tipo de células:

**Tabla 3.7.** Número de usuarios (Micro células - Downlink – Propagación Estática)

	Voz	Datos			
$\gamma_b$ [dB]	6,58	3,782	3,871	3,47	5
$v_j$	0,58	1	1	1	1
W [Mcps]	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84
$R_j$ [kbps]	<b>12,2</b>	<b>64</b>	<b>128</b>	<b>384</b>	<b>1200</b>
$\bar{i}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$\bar{\alpha}$	1	1	1	1	1
$\overline{n_{DL}}$ - Un usuario	$3,35 \times 10^{-3}$	$1,59 \times 10^{-2}$	$3,25 \times 10^{-2}$	$8,89 \times 10^{-2}$	$3,95 \times 10^{-1}$
<b>Número de usuarios (CANALES simultáneos)</b>	<b>298</b>	<b>63</b>	<b>31</b>	<b>11</b>	<b>3</b>

**Tabla 3.8.** Número de usuarios (*Micro células - Downlink – Propagación Multitrayectoria*)

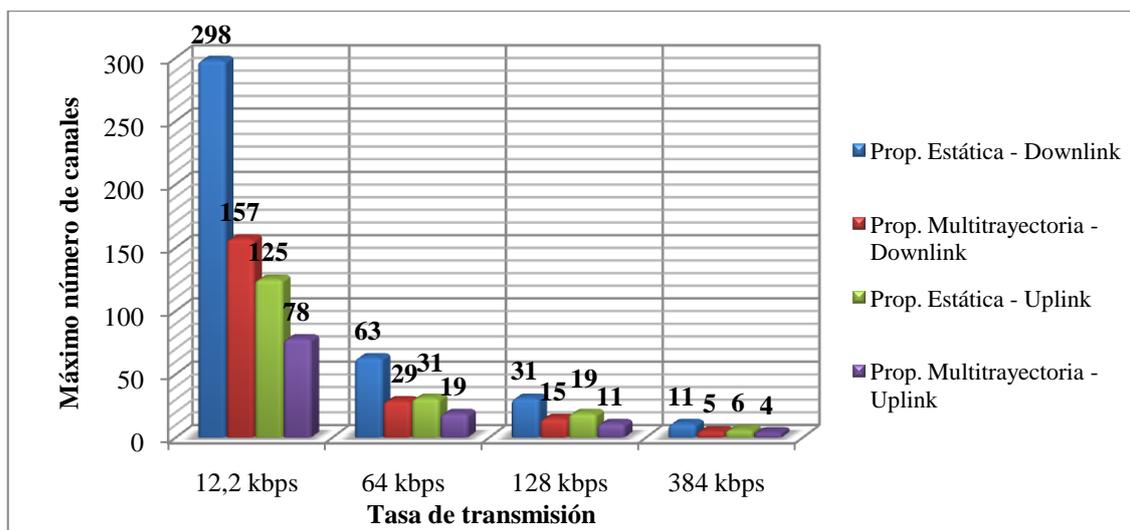
	<b>Voz</b>	<b>Datos</b>			
$\gamma_b$ [dB]	8,408	6,21	6,166	6,113	5
$v_j$	0,58	1	1	1	1
W [Mcps]	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84
$R_j$ [kbps]	<b>12,2</b>	<b>64</b>	<b>128</b>	<b>384</b>	<b>1200</b>
$\bar{i}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$\bar{\alpha}$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
$\overline{n_{DL}}$ - Un usuario	$6,39 \times 10^{-3}$	$3,48 \times 10^{-2}$	$6,89 \times 10^{-2}$	$2,04 \times 10^{-1}$	$4,94 \times 10^{-1}$
<b>Número de usuarios (CANALES simultáneos)</b>	<b>157</b>	<b>29</b>	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>2</b>

**Tabla 3.9.** Número de usuarios (*Micro células - Uplink – Propagación Estática*)

	<b>Voz</b>	<b>Datos</b>			
$\gamma_b$ [dB]	4,3	1,5	0,8	0,97	1,5
$v_j$	0,67	1	1	1	1
W [Mcps]	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84
$R_j$ [kbps]	<b>12,2</b>	<b>64</b>	<b>128</b>	<b>384</b>	<b>1200</b>
$\bar{i}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$\overline{n_{DL}}$ - Un usuario	$7,98 \times 10^{-3}$	$3,22 \times 10^{-2}$	$5,39 \times 10^{-2}$	$1,56 \times 10^{-1}$	$4,29 \times 10^{-1}$
<b>Número de usuarios (CANALES simultáneos)</b>	<b>125</b>	<b>31</b>	<b>19</b>	<b>6</b>	<b>2</b>

**Tabla 3.10.** Número de usuarios (*Micro células - Uplink – Propagación Multitrayectoria*)

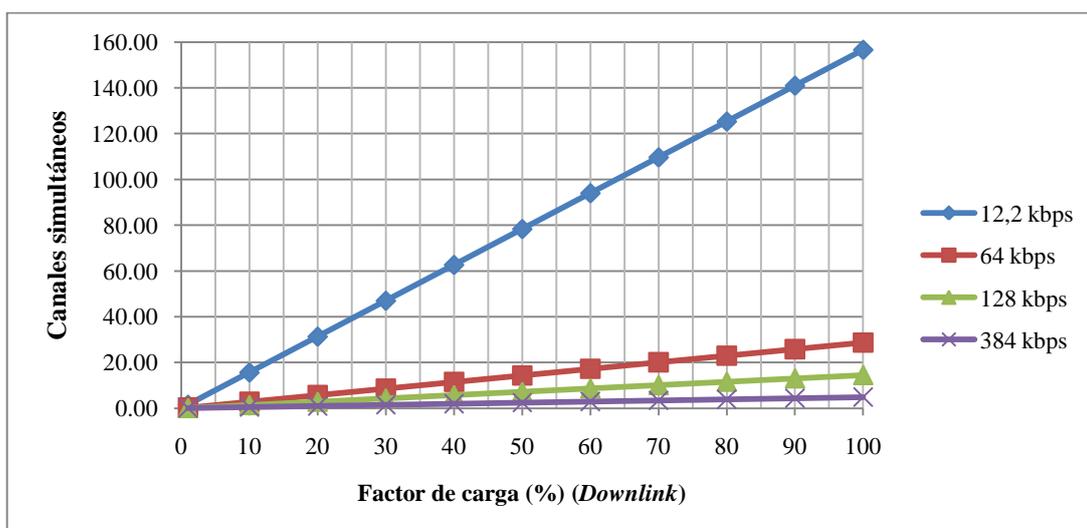
	<b>Voz</b>	<b>Datos</b>			
$\gamma_b$ [dB]	6,4	3,6	3,1	3,57	3
$v_j$	0,67	1	1	1	1
W [Mcps]	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84
$R_j$ [kbps]	<b>12,2</b>	<b>64</b>	<b>128</b>	<b>384</b>	<b>1200</b>
$\bar{i}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$\overline{n_{DL}}$ - Un usuario	$1,29 \times 10^{-2}$	$5,15 \times 10^{-2}$	$8,92 \times 10^{-2}$	$2,59 \times 10^{-1}$	$5,38 \times 10^{-1}$
<b>Número de usuarios (CANALES simultáneos)</b>	<b>78</b>	<b>19</b>	<b>11</b>	<b>4</b>	<b>2</b>



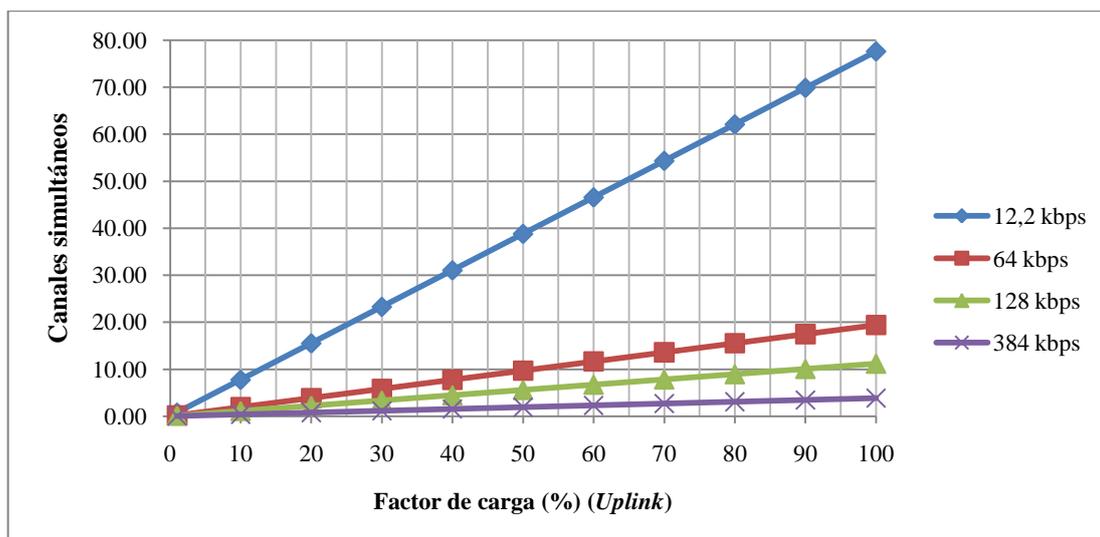
**Figura 3.4.** Máximo número de canales simultáneos para diferentes tasas de transmisión bajo un ambiente de Micro células

En la figura 3.4 se puede apreciar que para el caso de propagación multitrayectoria el número de canales simultáneos en el *downlink* siempre es mayor que en el *uplink* en una micro célula, no así cuando se trabaja con macro células. Esto se debe a que al trabajar con coberturas más pequeñas los códigos ortogonales empleados en el enlace descendente ya no son tan afectados por la multitrayectoria como en las macro células.

La relación entre el número de usuarios simultáneos y el factor de carga para un ambiente con multitrayectorias se muestra a continuación:



**Figura 3.5.** Número de canales simultáneos en función del factor de carga *Downlink* (Micro células - Propagación multitrayectoria)



**Figura 3.6.** Número de canales simultáneos en función del factor de carga Uplink (Micro células - Propagación multitrayectoria)

### 3.3 THROUGHPUT EN WCDMA

El *throughput* de un sistema constituye el rendimiento final del mismo, es decir el volumen de datos que una conexión brinda como resultante de la suma de su capacidad y la resta de los *overheads* que reducen su rendimiento. En los sistemas WCDMA estos *overheads* se tabulan con el BLER.

En WCDMA el *throughput* en una célula puede encontrarse mediante la siguiente expresión [18]:

$$Throughput_{WCDMA} = N R (1 - BLER) \quad (3.17)$$

Donde:

$N$  → Número de usuarios simultáneos en una célula

$R$  → Tasa de transmisión

En las tablas a continuación se presentan ejemplos de los resultados obtenidos al emplear la ecuación 3.17 para un ambiente de macro células con propagación estática:

**Tabla 3.11.** *Throughput* para 12.2 kbps (*Downlink*)

$n_{DL}$ (%)	Número de canales	<i>Throughput</i> (kbps)
1	2	22,16
10	18	221,63
20	37	443,26
30	55	664,88
40	73	886,51
50	92	1108,14
60	110	1329,77
70	128	1551,40
80	147	1773,03
90	165	1994,65
100	183	2216,28

**Tabla 3.12.** *Throughput* para 12.2 kbps (*Uplink*)

$n_{UL}$ (%)	Número de canales	<i>Throughput</i> (kbps)
1	1	12,85
10	11	128,50
20	21	256,99
30	32	385,49
40	43	513,98
50	53	642,48
60	64	770,97
70	74	899,47
80	85	1027,97
90	96	1156,46
100	106	1284,96

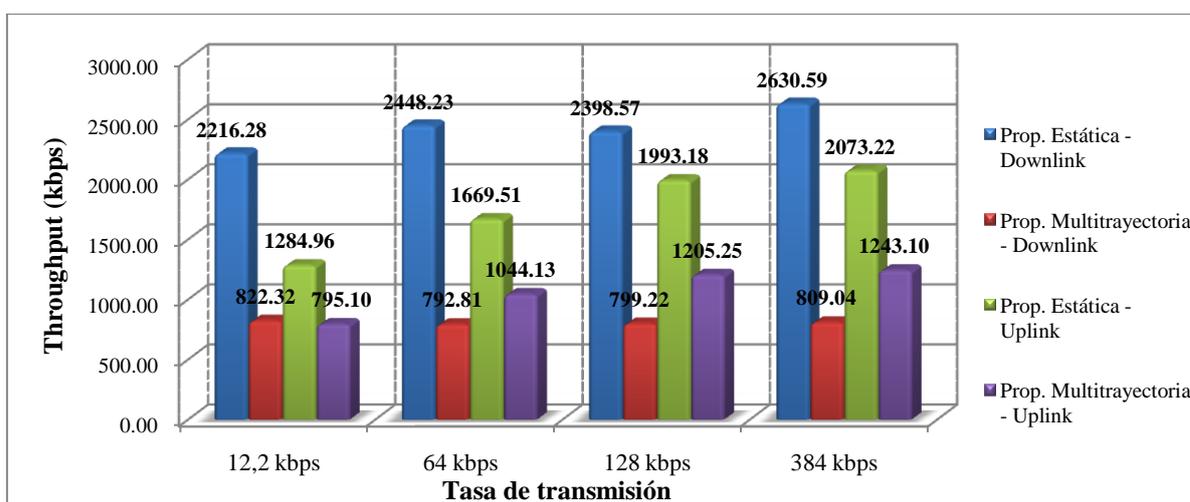
**Tabla 3.13.** *Throughput* para 64 kbps (*Downlink*)

$n_{DL}$ (%)	Número de canales	<i>Throughput</i> (kbps)
1	1	64,00
10	4	244,82
20	8	489,65
30	12	734,47
40	15	979,29
50	19	1224,12
60	23	1468,94
70	27	1713,76
80	31	1958,59
90	35	2203,41
100	39	2448,23

**Tabla 3.14.** *Throughput* para 64 kbps (*Uplink*)

$n_{UL}$ (%)	Número de canales	<i>Throughput</i> (kbps)
1	1	64,00
10	3	166,95
20	5	333,90
30	8	500,85
40	11	667,80
50	13	834,75
60	16	1001,70
70	18	1168,65
80	21	1335,61
90	24	1502,56
100	26	1669,51

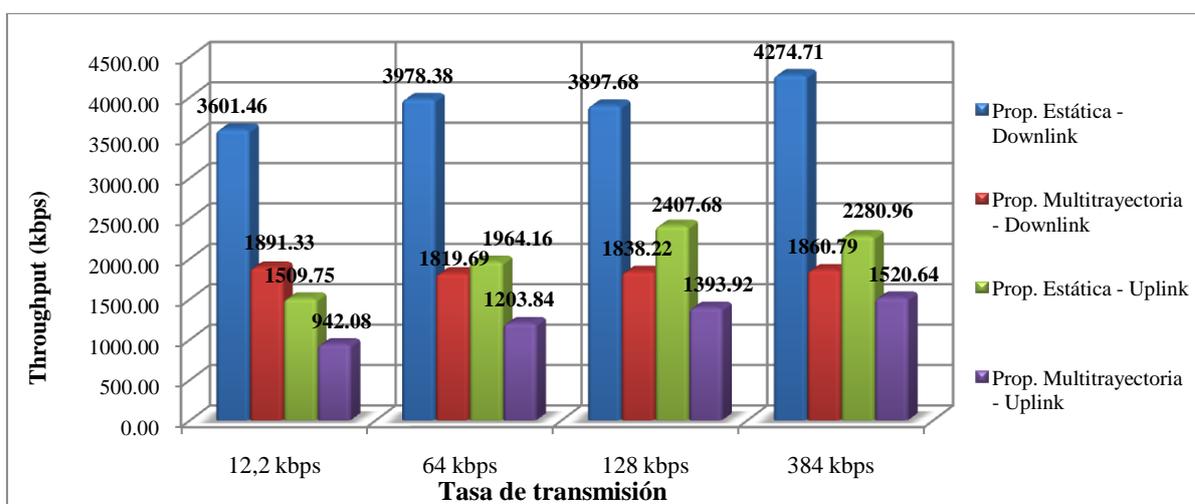
En la figura 3.7 se puede apreciar el *throughput* que se puede alcanzar cuando el factor de carga es igual al 100% en un ambiente de macro células.



**Figura 3.7.** *Throughput* en una macro célula WCDMA para diferentes tasas de transmisión

Para el caso de macro células se puede apreciar que el *throughput* en el *uplink* es mayor que en el *downlink* en un ambiente con multitrayectorias. Con esto podemos indicar que la capacidad que se maneja en el *downlink* es más sensitiva a aspectos de propagación y trayectorias múltiples, la razón de esta particularidad es el empleo de códigos ortogonales.

El máximo *throughput* que se puede alcanzar al emplear micro células se resume en la gráfica a continuación.

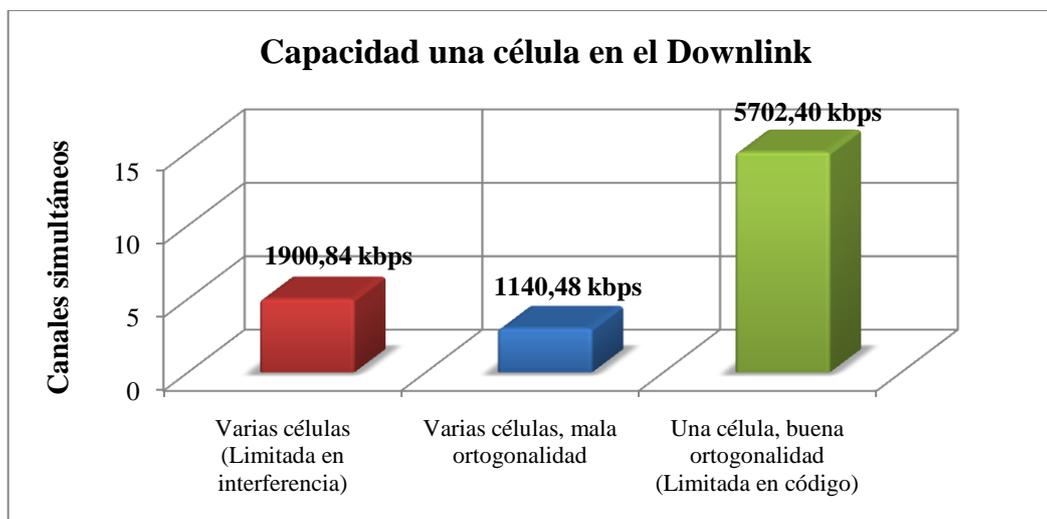


**Figura 3.8.** *Throughput* en una micro célula WCDMA para diferentes tasas de transmisión

A continuación se graficarán los cambios en el *throughput* debido a la variación de diversos parámetros considerados en el cálculo del factor de carga de la célula. En los datos presentados a continuación se considera que la célula se encuentra a su máxima capacidad. Se analizarán tres casos, el primero considera un sistema multicelular en el cual se tendrá una ortogonalidad perfecta, el segundo caso muestra el *throughput* para una célula limitada por interferencia de células adyacentes y una mala ortogonalidad y el tercer caso es una única célula con una ortogonalidad cercana a 1.

**Tabla 3.15.** Parámetros que alteran la capacidad de la célula en el *downlink*

Parámetros	Caso 1	Caso 2	Caso 3
$i$ (Relación de potencia)	0,9	0,7	0
$\alpha$ (Ortogonalidad)	1	0,4	0,7
$R$ (kbps)	384	384	384
Número de usuarios (CANALES simultáneos)	5	3	15
<i>Throughput</i> (kbps)	1900,80	1140,48	5702,40



**Figura 3.9.** Capacidad de una célula con usuarios con tasas de 384 kbps en diferentes casos

En la figura 3.9 se aprecia los efectos de parámetros como la interferencia proveniente de células adyacentes y la ortogonalidad, se observa que para un caso ideal se puede lograr un *throughput* cercano a los 6 Mbps en este caso la capacidad de la célula estará limitada únicamente por los códigos ortogonales empleados.

### 3.4 CAPACIDAD DE UNA CÉLULA EN FUNCIÓN DE LOS CÓDIGOS ORTOGONALES

Como se mencionó en la sección 1.5.4 los códigos ortogonales utilizados en WCDMA permiten la diferenciación de usuarios dentro de la misma célula, estos códigos son limitados para el *downlink* cuando se utiliza un único código de aleatorización. El número máximo de códigos ortogonales será igual al factor de ensanchamiento utilizado. Si se considera una célula en un entorno de propagación libre de interferencias y efectos multitrayectoria, la capacidad de la célula tendería al infinito empleando las ecuaciones de carga, sin embargo esto no sucede así, y el límite extremo de la capacidad de la célula constituye el número de códigos ortogonales empleados.

A continuación se considera un ejemplo para el cual los parámetros empleados se muestran en la tabla 3.16.

**Tabla 3.16.** Parámetros considerados para cálculo de la capacidad en función del número de códigos ortogonales

Parámetros	Valores empleados	Descripción
<b>Canales comunes</b>	10 códigos para un factor de ensanchamiento (SF) = 128 [18] 20 códigos para un factor de ensanchamiento (SF) = 256	Los canales comunes empleados en el <i>downlink</i> requieren canales disponibles a fin de llevar información entre la estación base y el UE.
<b>Factor de ensanchamiento</b>	Para 12,2 kbps → SF = 256 Para 64 kbps → SF = 128	$SF = \frac{\text{Tasa de chip}}{\text{Tasa de bit}}$ Se debe aproximar al valor más adecuado potencia de 2. (SF para el <i>downlink</i> : 2, 4, 8 ... 512)
<b>Modulación</b>	QPSK	QPSK emplea 2 bits por cada símbolo
<b>Sobrecarga por <i>Soft handovers</i></b>	20%	Un incremento en el número de <i>soft Handovers</i> genera el establecimiento de más conexiones en el sistema y parte de la capacidad del sistema será ocupada por esta sobrecarga de conexiones adicionales. Se recomienda un umbral de <i>soft handover</i> de 5dB lo que representa un 20% de <i>overhead</i> [32].
<b>Sobrecarga canal DPCCH para datos</b>	10% [18]	Ver Sección 2.7
<b>Codificación de canal</b>	Turbo códigos con tasa 1/3	Ver Sección 2.2.4
<b><i>Puncturing</i></b>	30% [18]	Ver Sección 2.2.3

Para el caso de AMR (*Adaptive Multi rate*) con 12,2 kbps se tiene:

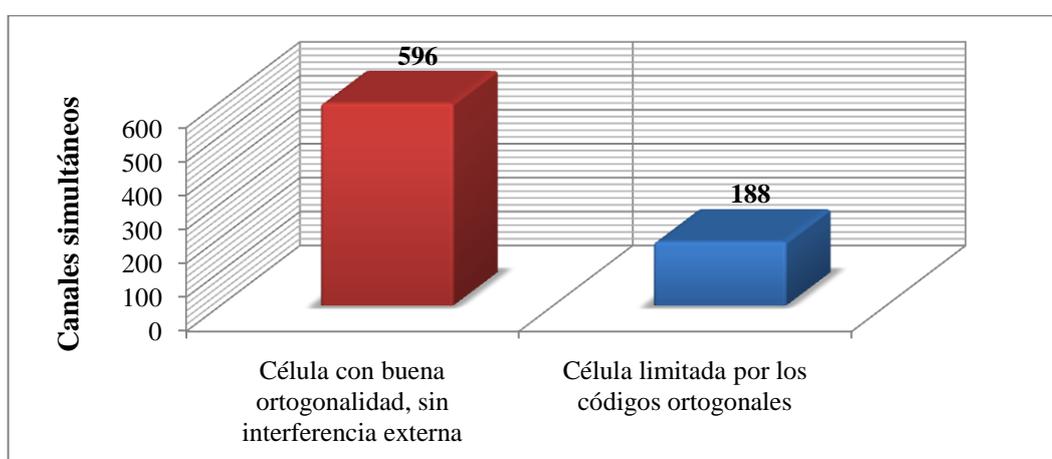
$$\text{Nro. Canales disponibles} = SF - \text{Nro. Canales comunes}$$

$$\text{Nro. Canales disponibles} = 256 - 20 = 236$$

Debido al *soft handover overhead* se puede emplear el 80% de los canales disponibles:

$$\text{Nro. Canales para servicios de voz} = 0,8 \times \text{Nro. Canales disponibles}$$

$$\text{Nro. Canales para servicios de voz} = \underline{188 \text{ canales}}$$



**Figura 3.10.** Límite superior de canales simultáneos de una célula en el *downlink* debido a los códigos ortogonales utilizados (Usuarios con tasas de 12,2 kbps)

Para determinar la capacidad de una célula con usuarios con una tasa de transmisión de 64 kbps utilizamos la expresión:

$$\text{Capacidad} = \text{Chip rate} \times n \times r \times \frac{1}{1-p} \times CCHo \times (1 - SHOo) \times (1 - DPCCHo) \quad (3.18)$$

Donde:

$n$  → Número de bits por símbolo

$p$  → *Puncturing*

$r$  → Tasa de código

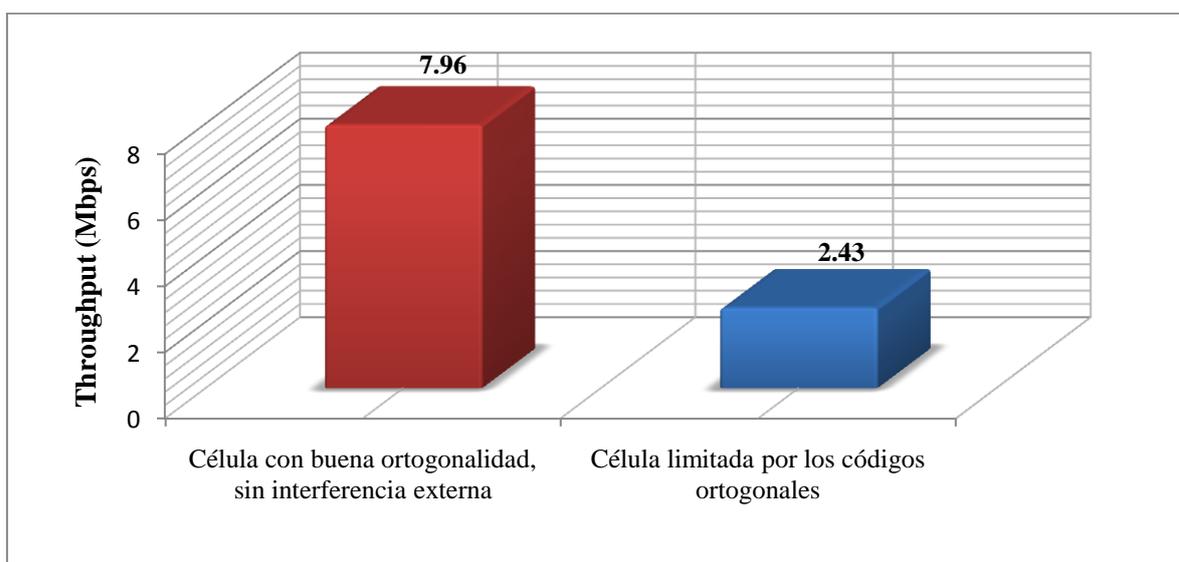
$CCHo$  → Sobrecarga por el empleo de canales comunes =  $\frac{SF - \text{Nro. canales comunes}}{SF}$

$SHOo$  → Sobrecarga por *Soft Handover*

$DPCCHo$  → Sobrecarga en el canal DPCCH

Utilizando los valores de la tabla 3.16 en la ecuación 3.18 se obtiene que la capacidad máxima de la célula es igual a 2,43 Mbps si se utiliza un único código de aleatorización.

En la figura 3.11 se puede apreciar que si se utiliza la ecuación de carga para el *downlink* (Ecuación 3.14) en un ambiente ideal es decir con una ortogonalidad perfecta e interferencia externa muy baja (para los ejemplo de las figuras  $\alpha = 1, i = 0.2$ ) el número de canales simultáneos y por ende la capacidad de la célula tiende al infinito cuando la ortogonalidad es perfecta y la interferencia es nula, pero como se mencionó anteriormente el límite superior de la capacidad de la célula está dado por la cantidad de códigos ortogonales que utiliza.



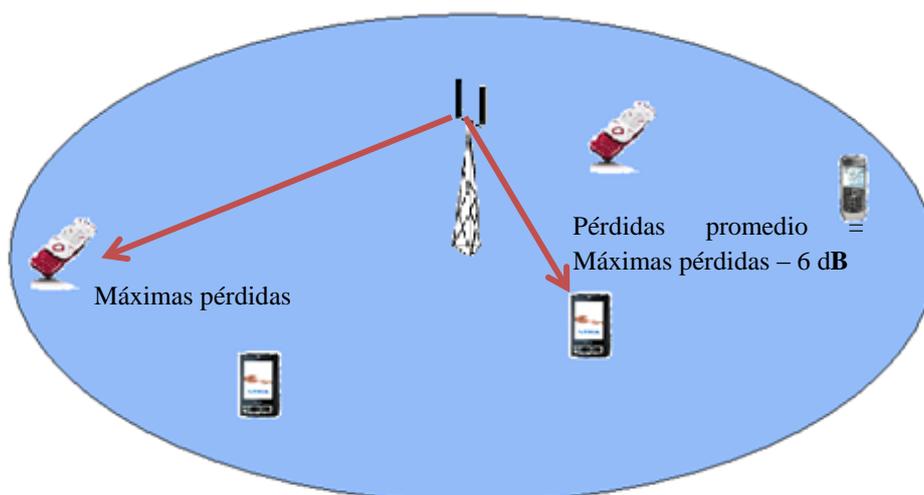
**Figura 3.11.** Límite superior de la capacidad de una célula en el *downlink* debido a los códigos ortogonales utilizados (Usuarios con tasas de transmisión de 64 kbps)

El número de códigos ortogonales no constituye una limitación del tipo *hard-blocking* (cantidad de *hardware*) para la capacidad en el *downlink*, pues si el número de códigos no es suficiente un segundo (o más) códigos de aleatorización pueden ser utilizados pero se requiere utilizar antenas inteligentes a fin de disminuir la interferencia creada entre los códigos de aleatorización.

### 3.5 POTENCIA DE TRANSMISIÓN PARA UN NODO B

Un factor importante a considerar en el dimensionamiento realizado para el *downlink* cuando se trabaja en un ambiente con macro celdas, constituye la potencia de transmisión empleada en la estación base a fin de lograr una determinada cobertura y tasas de transmisión adecuadas.

La potencia requerida por la estación base debe ser evaluada en función de la potencia de transmisión promedio requerida por cada usuario, más no por la potencia máxima de transmisión obtenida en un estudio de presupuesto de potencia. La razón es que en sistemas WCDMA, los usuarios que se encuentran en los límites de la célula requerirán mayor potencia que aquellos que se encuentren cerca de la estación base en el mismo instante de tiempo. La diferencia entre las pérdidas promedio y las máximas pérdidas en la trayectoria de propagación es de aproximadamente 6 dB en macro células [18].



**Figura 3.12.** Máximas pérdidas y mínimas pérdidas en una macro célula

La mínima potencia de transmisión requerida por cada usuario está determinada por la atenuación promedio ( $\bar{L}$ ) entre la estación base y el dispositivo móvil receptor y además por la sensibilidad del receptor, estos valores se consideran en ausencia de interferencia de acceso múltiple, es decir sin interferencia proveniente de la misma célula o de otras células.

El efecto del ruido ascendente debido a la interferencia se suma a la potencia mínima y en conjunto representan la potencia de transmisión requerida por un usuario en una localización promedio dentro de la célula. La potencia de transmisión empleada en la estación base puede ser expresada matemáticamente por la siguiente expresión [18]:

$$BTS_{power} = \frac{N_{rf} W \bar{L} \sum_{j=1}^N v_j \frac{(y_b)_j}{W/R_j}}{1 - \bar{n}_{DL}} \quad (3.19)$$

Donde  $N_{rf}$  es la densidad espectral de potencia en el receptor del dispositivo móvil y se obtiene de la siguiente manera [18]:

$$N_{rf} = k T + NF \quad (3.20)$$

$$N_{rf} = -174.0 \text{ dBm} + NF \quad (T = 290K) \quad (3.21)$$

Donde:

$k \rightarrow$  Constante de Boltzmann  $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

$T \rightarrow$  Temperatura en Kelvin

$NF \rightarrow$  Figura de ruido del receptor de la estación móvil (Típicamente de 5 a 9 dB)

Se debe considerar que parte de la potencia de transmisión empleada en la estación base es utilizada para canales físicos comunes los mismos que se transmiten de manera independiente a los canales de tráfico, por tanto la potencia que utilizan estos canales disminuye la capacidad de la célula. El consumo de potencia y funciones de los canales comunes se detalla en la tabla 3.17.

**Tabla 3.17.** Potencias típicas para los Canales Físicos Comunes empleados en el *downlink* [18]

<i>Canal Físico Común</i>	<b>Funciones</b>	<b>Actividad</b>	<b>Consumo promedio de potencia (W)</b>
<b>CPICH</b> ( <i>Canal Piloto Común</i> )	Utilizado como fase de referencia para los otros canales físicos.	100%	2,0
<b>P-SCH</b> ( <i>Canal de Sincronización Primario</i> )	Se utiliza para la búsqueda de estaciones base por parte de los terminales móviles.	10%	0,1
<b>S-SCH</b> ( <i>Canal de Sincronización Secundario</i> )	Permite establecer el sincronismo en las tramas e identificar los códigos utilizados por una estación base en particular.	10%	0,1
<b>P-CCPCH</b> ( <i>Canal Físico de Control Común Primario</i> )	Transporta información de control a una tasa de transmisión constante de 30 kbps.	90%	0,6
<b>PICH</b> ( <i>Canal Indicador de Paginación</i> )	Es utilizado para indicar al terminal móvil cuando debe leer el canal de transporte PCH (Canal de Paginado).	100% (Peor caso)	0,3
<b>AICH</b> ( <i>Canal Indicador de Adquisición</i> )	Transporta las respuestas a los preámbulos de acceso del canal PRACH (Canal Físico de Acceso Randómico).	100% (Peor caso)	0,3
<b>S-CCPCH</b> ( <i>Canal Físico de Control Común Secundario</i> )	Transporta información de control a una tasa de transmisión variable.	10%	0,2
		<b>Potencia Total</b>	<b>3,6 W</b>

### 3.5.1 Potencia de transmisión en equipos comerciales

La mayoría de fabricantes de equipos UMTS basan sus diseños en las especificaciones técnicas elaboradas por la 3GPP, pero debido a las necesidades de los operadores, usuarios y la aparición de nuevos servicios, los equipos con esta tecnología tienen características que sobrepasan los requerimientos técnicos básicos descritos en dichas especificaciones, por tal motivo a continuación se consideran valores para parámetros básico en el funcionamiento de un Nodo B en función de diferentes marcas de equipos presentes en el mercado:

Tabla 3.18. Características técnicas Nodo B Fujitsu – Alcatel [33]

<b>MARCA</b>	<b>FUJITSU – ALCATEL</b>	
<b>UNIDAD</b>	<b>9100 MBS</b>	
	<b>Portadoras</b>	3 - 6
	<b>Método de Acceso</b>	FDD
	<b>Potencia</b>	20 W – 35 W
	<b>Tasa de transmisión</b>	Hasta 384 kbps

Tabla 3.19. Características técnicas Nodo B Lucent [33]

<b>MARCA</b>	<b>LUCENT</b>	
<b>UNIDAD</b>	<b>OneBTS</b>	
	<b>Portadoras</b>	6 (3 sectores)
	<b>Método de Acceso</b>	FDD
	<b>Potencia</b>	20 W – 40 W
	<b>Tasa de transmisión</b>	Hasta 384 kbps

Tabla 3.20. Características técnicas Nodo B Motorola [33]

<b>MARCA</b>	<b>MOTOROLA</b>	
<b>UNIDAD</b>	<b>Aspira Node B</b>	
	<b>Portadoras</b>	6 (6 sectores)
	<b>Método de Acceso</b>	FDD
	<b>Potencia</b>	20 W (por sector)
	<b>Tasa de transmisión</b>	Hasta 384 kbps

Tabla 3.21. Características técnicas Nodo B Motorola [33]

<b>MARCA</b>	<b>NORTEL</b>	
<b>UNIDAD</b>	<b>iBTS Indoor</b>	
	<b>Portadoras</b>	9 – 12 (6 sectores)
	<b>Método de Acceso</b>	FDD
	<b>Potencia</b>	45 W (por sector)
	<b>Tasa de transmisión</b>	No especificado

### 3.5.2 Throughput de una célula en función de la potencia del Nodo B

Como se observa en las tablas 3.18 a la 3.20, la potencia de transmisión de una estación base en UMTS tiene diversos rangos de operación dependiendo del número de portadoras o sectores que se utilicen en función de las necesidades del sistema, además según la potencia de transmisión que utilicemos dependerá el *throughput* que se puede manejar en el área de cobertura de la célula.

#### *Pérdidas en la trayectoria para el downlink*

A fin de analizar el efecto que tiene la potencia empleada en el Nodo B para el *throughput* en el *downlink* se debe considerar en el análisis parámetros como la atenuación promedio entre la estación base y el dispositivo móvil receptor ( $\bar{L}$ ), consumo de potencia por parte de los canales comunes, figura de ruido del dispositivo móvil y la ganancia de las antenas empleadas en la estación base.

A continuación se realizará el análisis para un sistema en el cual los usuarios manejan una tasa de transmisión de 64 kbps en un ambiente con multitrayectorias con el objetivo de verificar los efectos de la potencia de transmisión en el *throughput* para el *downlink*, para ello despejamos de la ecuación 3.19 las pérdidas promedio:

$$\bar{L} = \frac{BTS_{power} (1 - \bar{n}_{DL})}{N_{rf} W \sum_{j=1}^N v_j \frac{(\gamma_b)_j}{W/R_j}} \quad (3.22)$$

Debido a que todos los N usuarios emplearán la misma tasa de transmisión, la ecuación anterior se reduce a:

$$\bar{L} = \frac{BTS_{power} (1 - \bar{n}_{DL})}{N_{rf} N v (\gamma_b) R} \quad (3.23)$$

Recordando que la diferencia entre las pérdidas promedio y las máximas pérdidas en la trayectoria de propagación es de aproximadamente 6 dB en macro células:

$$L_{max} = \bar{L} + 6 \text{ [dB]} \quad (3.24)$$

Los valores de los parámetros empleados son los mismos que se utilizaron para el cálculo del número usuarios, dichos valores se muestran en la tabla 3.22:

**Tabla 3.22.** Parámetros considerados para ejemplo de cálculos de pérdidas en la trayectoria para el *downlink*

Parámetro	Valor
$\gamma_b$ [dB]	6,201
$v_j$	1
W [Mcps]	3,84
$R_j$ [kbps]	<b>64</b>
$\bar{i}$	0,65
$\bar{\alpha}$	0,5
$\overline{n_{DL}}$ - Un usuario	$7,99 \times 10^{-2}$
<b>Número de usuarios (CANALES)</b>	<b>13</b>

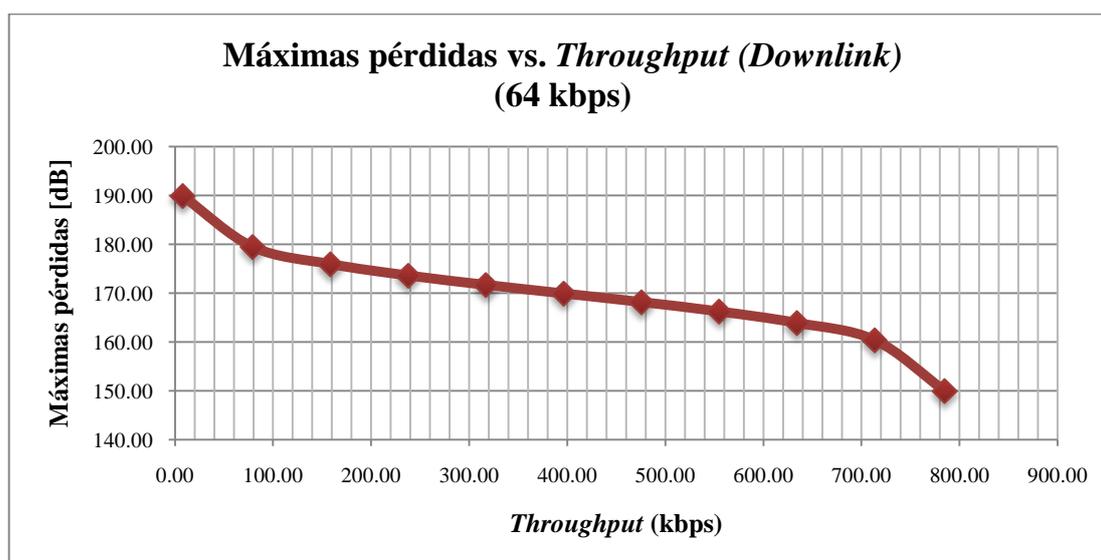
El valor de la potencia de transmisión para el Nodo B será de 20 W teniendo en cuenta que es un valor promedio para los equipos comerciales, se empleará además el valor promedio para la figura de ruido del dispositivo móvil, es decir 7 dB y la ganancia de la antena ubicada en la estación base será de 18 dBi para el análisis considerando que existen diversos tipos de antenas con un variado rango de ganancias superior a los 17 dBi.

**Tabla 3.23.** Consideraciones para ejemplo de cálculos de pérdidas en la trayectoria

Parámetro	Valor
<b>Potencia de transmisión (Nodo B)</b>	20 W
<b>Ganancia de la antena en el Nodo B</b>	18 dBi
<b>Ganancia de la antena del UE</b>	2 dBi (Datos) 0 dBi (Voz)
<b>Consumo de potencia por canales físicos comunes</b>	3,6 W
<b>Figura de ruido del dispositivo móvil</b>	7 dB

**Tabla 3.24.** Resultados obtenidos para pérdidas máximas de la trayectoria en función del *throughput* para el *downlink*

$\overline{n_{DL}}$	$\overline{n_{DL}}(\%)$	Número de canales	Throughput (kbps)	$\overline{L}$ [dB]	L [dB] + $G_{antena}$	$L_{max}$ [dB] - Downlink
<b>0,01</b>	1	0	---	---	---	---
<b>0,1</b>	10	1	79,28	153,45	173,45	<b>179,45</b>
<b>0,2</b>	20	3	158,56	149,92	169,93	<b>175,93</b>
<b>0,3</b>	30	4	237,84	147,58	167,59	<b>173,59</b>
<b>0,4</b>	40	5	317,12	145,66	165,67	<b>171,67</b>
<b>0,5</b>	50	6	396,40	143,90	163,91	<b>169,91</b>
<b>0,6</b>	60	8	475,69	142,14	162,15	<b>168,15</b>
<b>0,7</b>	70	9	554,97	140,22	160,23	<b>166,23</b>
<b>0,8</b>	80	10	634,25	137,88	157,89	<b>163,89</b>
<b>0,9</b>	90	11	713,53	134,36	154,37	<b>160,37</b>
<b>1</b>	100	13	792,81	---	---	---

**Figura 3.13.** Máximas pérdidas en el *downlink* en función de la capacidad de la célula

### *Pérdidas en la trayectoria para el uplink.*

A fin de establecer la capacidad que puede soportar una célula es de gran importancia analizar las máximas pérdidas que existen en el *uplink*, para lo cual se deben considerar algunos parámetros como los descritos a continuación:

### Potencia de transmisión del dispositivo móvil.

La especificación técnica 3GPP clasifica a los UE en clases en función de la potencia nominal de transmisión y bandas de operación de cada equipo según lo indicado en la tabla 3.25.

**Tabla 3.25.** Clasificación de los UE según la 3GPP [30]

Banda de Operación	Rango de Frecuencias		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
	$T_x$ (MHz)	$R_x$ (MHz)	Potencia (dBm)	Potencia (dBm)	Potencia (dBm)	Potencia (dBm)
<b>Banda I</b>	1920 -1980	2110-2170	+ 33	+ 27	+24	+ 21
<b>Banda II</b>	1850-1910	1930-1990	-	-	+24	+ 21
<b>Banda III</b>	1710-1785	1805-1880	-	-	+24	+ 21
<b>Banda IV</b>	1710-1755	2110-2155	-	-	+24	+ 21
<b>Banda V</b>	824-849	869-894	-	-	+24	+ 21
<b>Banda VI</b>	830-840	875-885	-	-	+24	+ 21

### Sensibilidad del receptor.

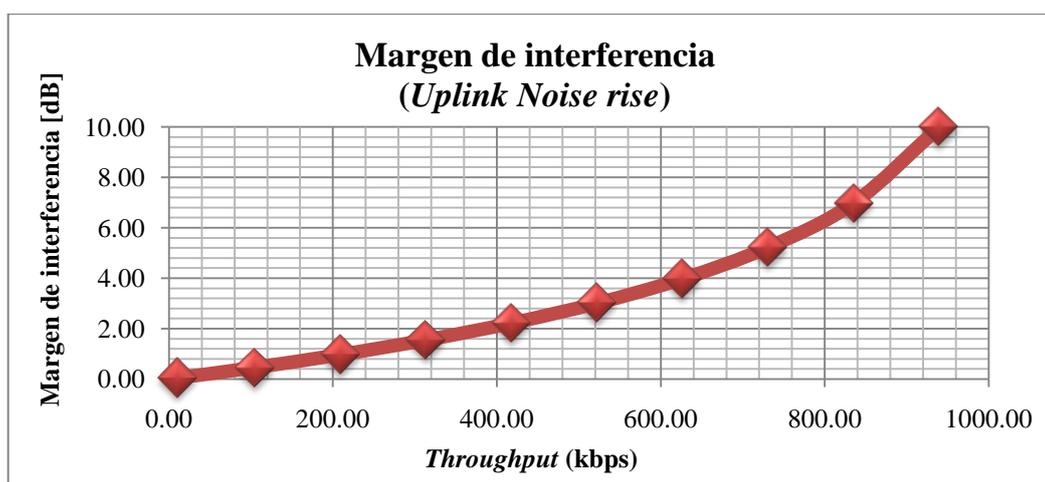
La sensibilidad del receptor es el nivel de potencia mínimo requerido en la antena del dispositivo receptor para el cual los valores del BER no sobrepasen los valores especificados. Para el caso de análisis el dispositivo receptor será el Nodo B y para determinar la sensibilidad del mismo se emplea la siguiente expresión:

$$\text{Sensibilidad}_{\text{Nodo B}} [\text{dB}] = N_{rf} + \rho_{\text{objetivo}} + \text{Tasa de bits en dB} - \gamma_b \quad (3.25)$$

### Margen de interferencia.

El margen de interferencia indica el límite de interferencia con el que puede trabajar el sistema manejando tasas de error aceptables. Para sistemas WCDMA el margen de interferencia es igual al ruido ascendente el cual se define en la ecuación 3.12.

La figura 3.14 indica el comportamiento del ruido ascendente en función de la capacidad de la célula para usuarios con una tasa de transmisión de 64 kbps,  $\bar{i}$  igual a 0,65 y un  $\gamma_b$  de 6,201 dB.



**Figura 3.14.** Margen de interferencia en el *uplink* en función del *throughput*

#### *Margen de rápido desvanecimiento.*

El rápido desvanecimiento ocurre cuando el tiempo de coherencia del canal (tiempo durante el cual el canal permanece estable) es relativamente pequeño respecto al retardo que presenta dicho canal. Debido a este efecto, la amplitud y la fase cambian lo que hace que la señal varíe considerablemente. Este desvanecimiento se produce cuando el UE se encuentra en movimiento. Para disminuir los efectos del rápido desvanecimiento se utiliza macro diversidad, la cual se aplica cuando el UE se encuentra en un estado de handover. La macro diversidad hace que las señales deseadas de un terminal móvil sean recibidas por más de una estación base y son sumadas juntas en el RNC. La ganancia que da la macro diversidad es de aproximadamente 2 dB [34].

Una vez que se han definido los parámetros necesarios para el cálculo de las pérdidas en la trayectoria para el caso del *uplink*, se procederá a determinar el *throughput* que se pueden alcanzar en función de dichas pérdidas. Los valores de los parámetros empleados para este cálculo se muestran en la tabla 3.26. A fin de asegurar que la célula tenga un *throughput* adecuado en el *uplink*, se debe manejar un margen de interferencia con valores convenientes, los valores típicos empleados van de 1 a 3 dB para etapas de implementación iniciales y un máximo de 6 dB cuando se requiere la máxima capacidad de la célula [34].

**Tabla 3.26.** Parámetros considerados para ejemplo de cálculos de pérdidas en la trayectoria para el *uplink*

Parámetro	Valor
$\gamma_b$ [dB]	3,6
$v_j$	1
$R_j$ [kbps]	<b>64</b>
$\bar{i}$	0,65
$\overline{n_{DL}}$ - Un usuario	$6,07 \times 10^{-2}$
Número de canales	<b>16</b>

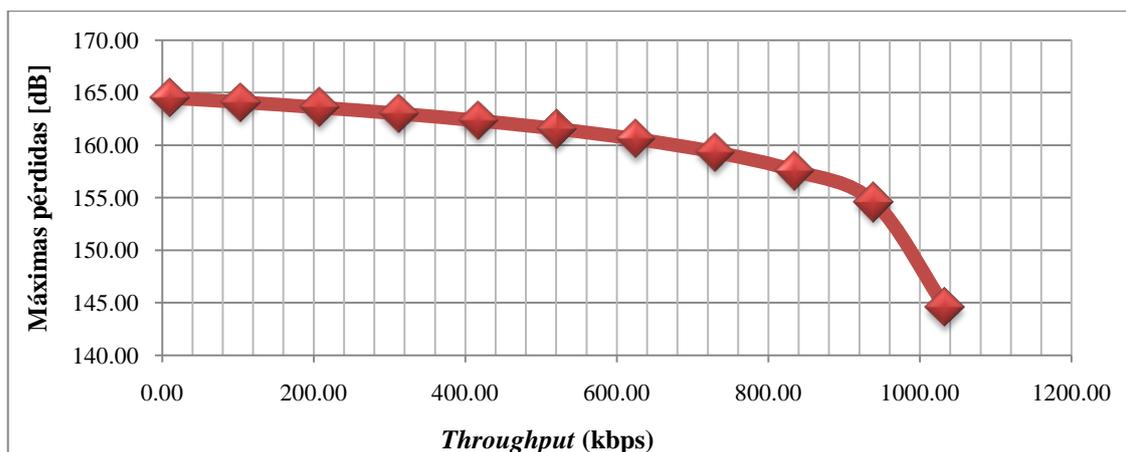
Parámetro	Valor
Potencia de transmisión del UE	21 dBm
Sensibilidad Nodo B (Ver Ec. 3.25)	$S = (-174 \text{ dBm} + 5 \text{ dB}) + 3 \text{ dB} + 10 \log(64000) - 3,6 \text{ dB}$ $= -121,54 \text{ dBm}$
Ganancia macro diversidad	2 dB
Ganancia de la antena en el Nodo B	18 dBi
Ganancia de la antena del UE	2 dBi (Datos), 0 dBi (Voz)

La tabla 3.27 y la figura 3.15 muestran la relación entre el *throughput* y las máximas pérdidas en el trayecto para el *downlink*, las cuales se determinaron utilizando la siguiente expresión:

$$L_{max \text{ uplink}} [\text{dB}] = P_{UE} - S + \text{Ganancia}_{antenas} - \rho_{UL} + \text{Ganancia}_{macro\_diversidad} \quad (3.26)$$

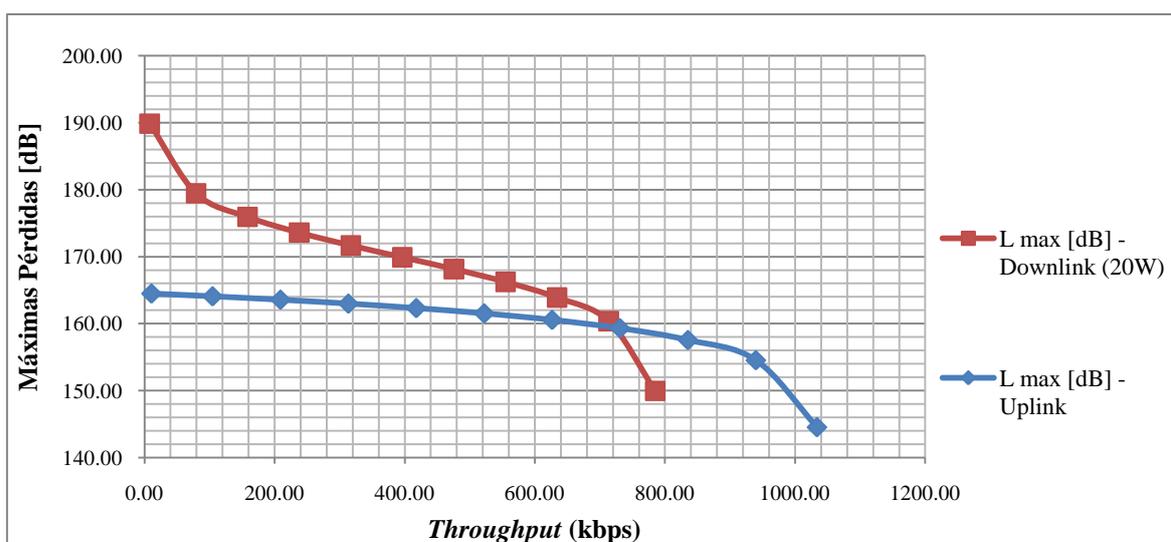
**Tabla 3.27.** Resultados obtenidos para pérdidas máximas de la trayectoria en función del *throughput* y el *margen de interferencia* para el *uplink*

$\overline{n_{UL}}$ (%)	Número de canales	Throughput (kbps)	$\rho_{UL}$ [dB]	$L_{max}$ [dB] - Uplink
<b>1</b>	1	64,00	0,04	<b>164,50</b>
<b>10</b>	2	104,41	0,46	<b>164,08</b>
<b>20</b>	3	208,83	0,97	<b>163,57</b>
<b>30</b>	5	313,24	1,55	<b>162,99</b>
<b>40</b>	7	417,65	2,22	<b>162,32</b>
<b>50</b>	8	522,07	3,01	<b>161,53</b>
<b>60</b>	10	626,48	3,98	<b>160,56</b>
<b>70</b>	12	730,89	5,23	<b>159,31</b>
<b>80</b>	13	835,31	6,99	<b>157,55</b>
<b>90</b>	15	939,72	10,00	<b>154,54</b>
<b>100</b>	16	1044,13	---	---



**Figura 3.15.** Máximas pérdidas en el *uplink* en función de la capacidad de la célula

Si colocamos los resultados de las pérdidas máximas en función del *throughput* obtenido anteriormente para el *downlink* y el *uplink* en una sola gráfica podemos identificar varios aspectos importantes al relacionar estas dos curvas.



**Figura 3.16.** Gráfica comparativa entre las máximas pérdidas en el *uplink* y *downlink* en función de la capacidad de la célula

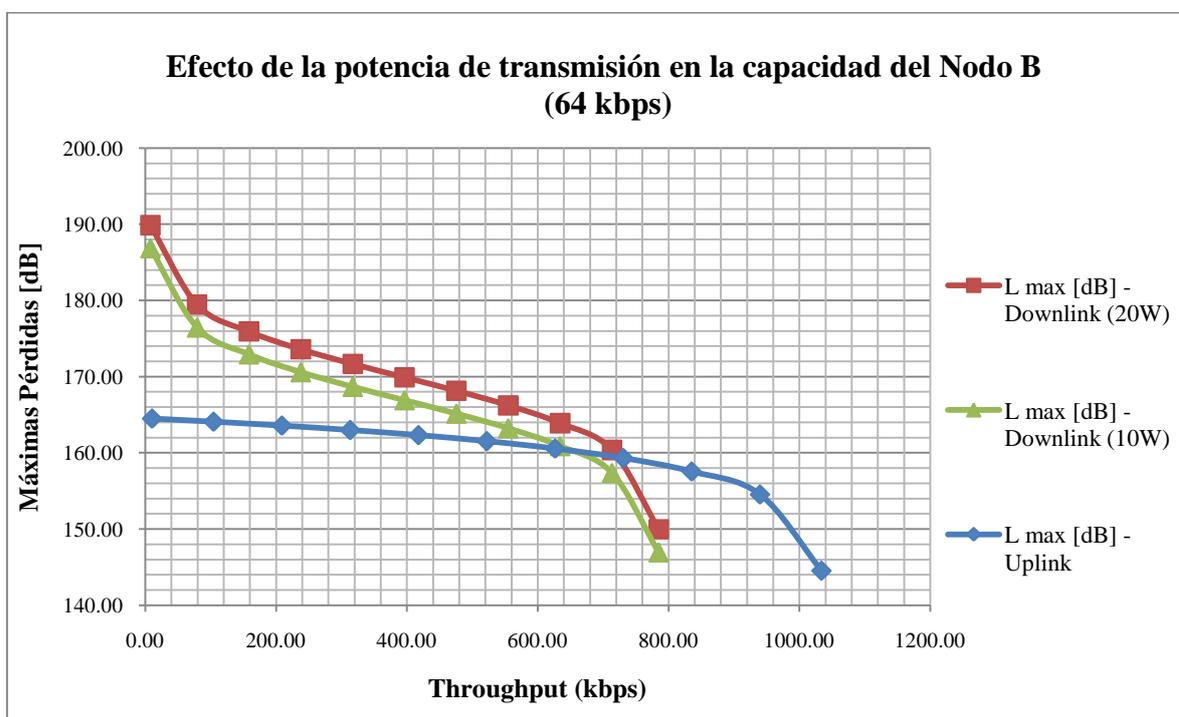
La capacidad del sistema tanto para el *uplink* como para el *downlink* afecta la cobertura de la célula pero de una manera diferente. Se puede apreciar que en el *downlink* la cobertura depende más de la capacidad de la célula que para el caso del *uplink*. Esto se debe a que la potencia total empleada en el *downlink* se reparte entre la cantidad total de usuarios.

Es importante destacar además que en redes de tercera generación el tráfico de datos puede ser asimétrico entre el *downlink* y el *uplink* y por tanto la carga del sistema puede ser diferente para un mismo valor de pérdidas.

Como se mencionó el margen de interferencia en etapas iniciales de implementación que se puede tolerar para el *uplink* es de 3 dB y esto hace que la cobertura de la célula se encuentre limitada por el enlace ascendente, mientras que la capacidad del sistema está limitada por el *downlink*.

#### *División de la potencia entre frecuencias.*

A fin de establecer los efectos que tiene la potencia de transmisión de la estación base en el *throughput* para el enlace descendente, se considerará un Nodo B en el cual la potencia de transmisión va a ser dividida entre dos frecuencias portadoras en partes iguales.

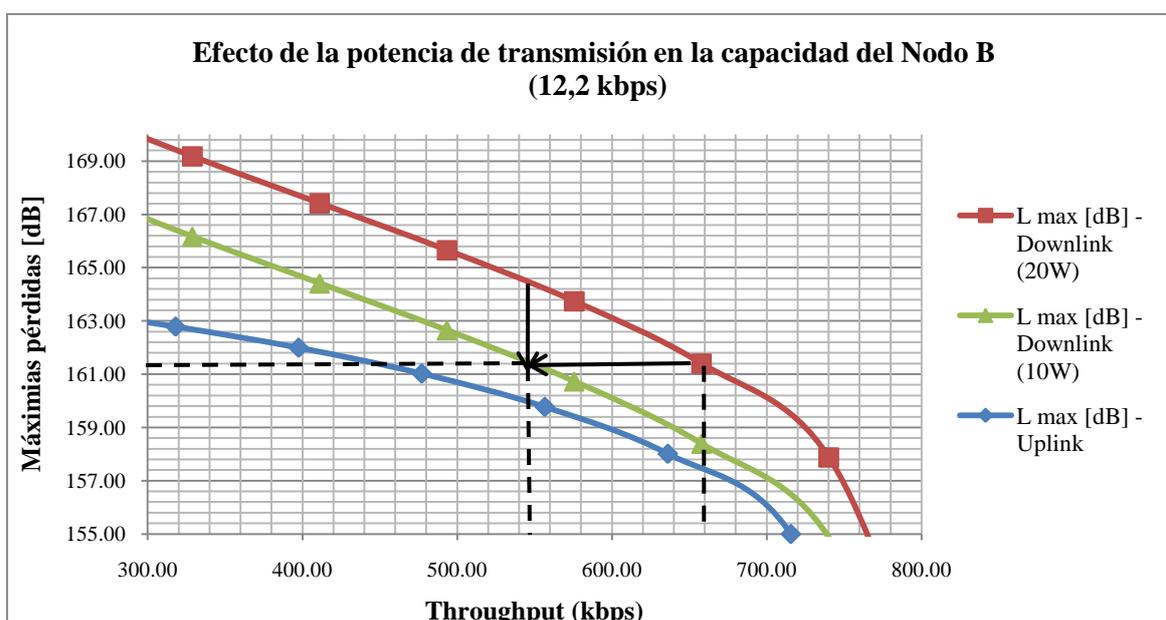


**Figura 3.17.** Efectos de la potencia de transmisión sobre la capacidad de la célula para usuarios con tasas de 64 kbps



kbps (Servicio de voz con AMR), debemos considerar para este análisis  $3\text{ dB}$  adicionales [18] por pérdidas que se producen cuando el usuario tiene el dispositivo móvil cerca de su cabeza.

Para el *uplink* las máximas pérdidas tolerables son de  $161,99\text{ dB}$ , en este punto el *throughput* para una potencia de  $20\text{ W}$  es de  $630\text{ kbps}$  y para  $10\text{ W}$  es de  $525\text{ kbps}$ . Por tanto la capacidad de la célula disminuyó en un  $16,67\%$  y la cobertura en  $3\text{ dB}$ . Si se utilizan dos frecuencias portadoras, la capacidad del sistema incrementaría en un  $66,67\%$ .



**Figura 3.19.** Cambios en la cobertura y capacidad de la célula debido a la potencia de transmisión utilizada en el Nodo B para usuarios con servicios de voz ( $12,2\text{ kbps}$ )

Por lo tanto aumentar la potencia de transmisión en el nodo B no es una vía eficiente para incrementar la capacidad de una célula cuando ésta se ve limitada por interferencia y se puede utilizar esta técnica eficiente de dividir la potencia entre las portadoras para elevar el *throughput* de una célula en el *uplink*, pues al dividir la potencia disminuye la capacidad de la célula en el enlace descendente y la capacidad en el *uplink* no se ve afectada, y sería como realizar una sectorización real la cual explota al máximo la capacidad de una célula para el enlace ascendente.

## 3.6 MECANISMOS PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE UN SISTEMA UMTS

La capacidad en el *downlink* se puede incrementar de diferentes maneras cuando la cantidad de tráfico requerido aumenta. Se debe tener en cuenta que estos mecanismos para aumentar la capacidad no están disponibles en todas las estaciones base, sino que estas técnicas dependen exclusivamente de los fabricantes. Existen diversas técnicas para mejorar el *throughput* en una estación base, las técnicas más utilizadas se detallan a continuación [18]:

### 3.6.1 Incrementar los amplificadores de potencia

Esta técnica es muy utilizada cuando el empleo de división de la potencia entre portadoras ya no constituye un mecanismo eficiente o no se dispone del espectro suficiente. Se utiliza un amplificador de potencia por cada sector lo cual permite ocupar la máxima capacidad para cada sector.

Cuando se empleó división de potencia entre frecuencias para una tasa de transmisión de 64 kbps, una potencia de 20W y utilizando una portadora se logra un *throughput* de 725 kbps, si empleamos 3 sectores y un amplificador de potencia en cada uno de ellos se podrá alcanzar una capacidad de  $3 \times 725 \text{ kbps} = 2175 \text{ kbps}$ .

### 3.6.2 Emplear varias frecuencias portadoras

Esta opción se puede considerar siempre que el operador cuente con una concesión que le permita utilizar varias frecuencias portadoras y con el ancho de banda suficiente para la tecnología WCDMA. Cuando se emplea este mecanismo se puede considerar el utilizar un amplificador de potencia para cada frecuencia o considerar la técnica de división de potencia entre portadoras.

Para el ejemplo de la sección 3.5.2, si utilizamos 3 sectores, además disponemos de 2 frecuencias portadoras y un amplificador de potencia por sector, el *throughput* alcanzado será  $2 \times 3 \times 690 \text{ kbps} = 4140 \text{ kbps}$ , recordando que se dividió la potencia de transmisión entre las 2 portadoras (*Ver División de la potencia entre frecuencias*).

### 3.6.3 Empleo de diversidad en la transmisión

La capacidad en el *downlink* obviamente podría ser mejorada utilizando diversidad de antenas en el dispositivo móvil, pero debido a que se busca equipos pequeños y económicos para el usuario esto no es posible, por tanto el empleo de esta técnica es mover la complejidad del empleo de recepción con diversidad de antenas en el terminal móvil a la transmisión en el nodo B.

Esta técnica ayuda a disminuir la probabilidad de error debido a que múltiples señales se reciben en el terminal móvil las cuales son combinadas. Utilizar diversidad en la transmisión permite obtener ganancias de 2,8 dB cuando los usuarios son peatones y 0,8 dB cuando se encuentra en un vehículo en movimiento [34], dicha ganancia incluye la utilización de combinación coherente en el dispositivo móvil y la ganancia contra el desvanecimiento. Esta ganancia implica que la potencia promedio de cada conexión en el *downlink* puede ser disminuida en 2,8 u 0,8 dB respectivamente manteniendo la misma calidad, al mismo tiempo que el sistema puede soportar más usuarios lo que implica un mayor *throughput*.

Tabla 3.28. Ganancia por diversidad en la transmisión [34]

Tipo de usuario	Ganancia por diversidad	Incremento de usuarios
Peatón	2,8 dB	90 %
En vehículo	0,8 dB	20 %

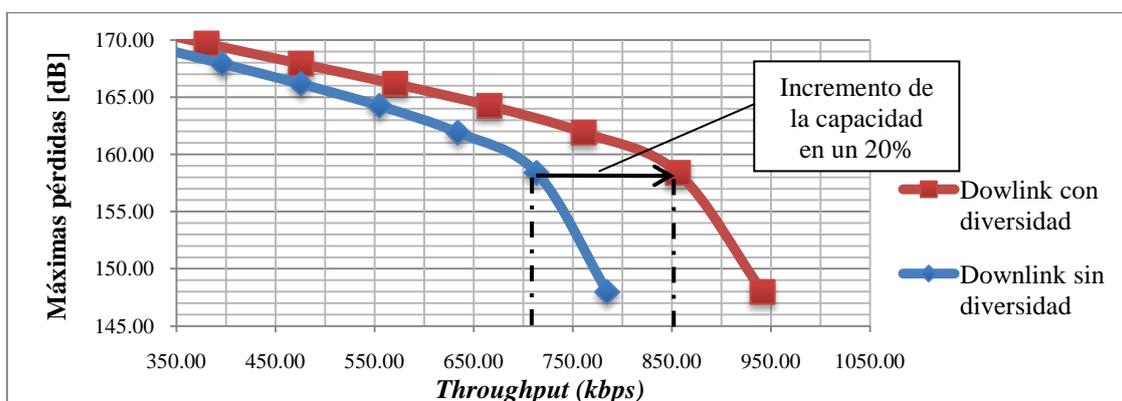
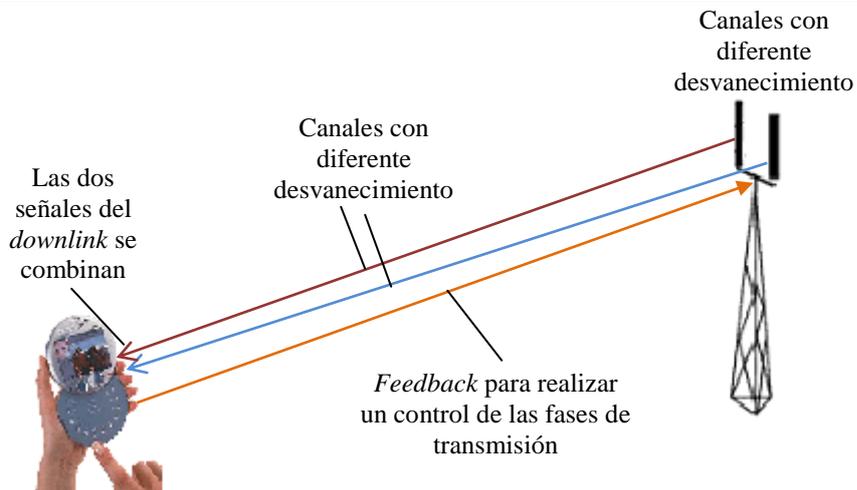
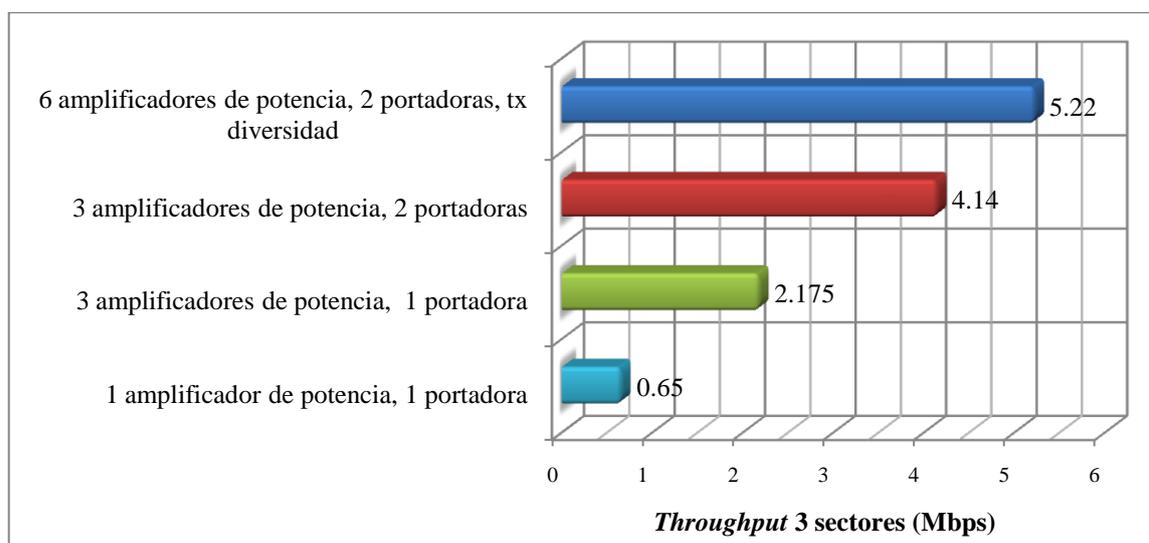


Figura 3.20. Efectos de la diversidad en la transmisión (Usuarios con tasas de 64 kbps en movimiento)



**Figura 3.21.** Diversidad en la transmisión con *feedback*

Para el ejemplo que se ha venido analizando se considerará emplear 3 sectores, 2 frecuencias portadoras y dos amplificador de potencia por sector, el *throughput* alcanzado será  $2 \times 3 \times 725 \text{ kbps} \times 1,2 = 5220 \text{ kbps}$ , donde el factor 1,2 representa una ganancia de 0,8 dB asumiendo que se trata de usuarios que se encuentra en vehículos en movimiento.



**Figura 3.22.** Efectos de los mecanismos para incrementar la capacidad de una célula UMTS

### 3.7 TRÁFICO EN UNA CÉLULA UMTS

#### 3.7.1 Introducción a las teorías de tráfico

Emplear teorías de tráfico en una red consiste en la aplicación del cálculo de probabilidades a fin de solucionar problemas de planificación, prestaciones, operación y mantenimiento de sistemas de telecomunicaciones. La teoría de tráfico puede considerarse como una disciplina de planificación en la que se emplean herramientas como los procesos estocásticos, teoría de colas y simulaciones numéricas.

La unidad de medida del tráfico en telecomunicaciones se denomina Erlang. En sentido estricto un Erlang representa el uso continuo de un canal de voz; pero en la práctica se emplea para medir el volumen de tráfico en una hora. Las medidas de tráfico Erlang sirven para que los diseñadores de redes comprendan el tráfico que se produce en la red y, en consecuencia, diseñen la topología adecuada y dimensionen correctamente los enlaces.

#### 3.7.2 Modelo Erlang B

El modelo Erlang B asume una población infinita de orígenes (como usuarios de telefonía), la cual ofrece tráfico en conjunto a  $N$  servidores (canales disponibles). La tasa de llegadas de nuevas llamadas es igual a  $\lambda$  y es constante, *no* depende del número de recursos activos, porque se asume que el total de recursos es infinito. La tasa de abandono (tasa de mortandad) es igual al número de llamadas en progreso dividida por  $h$ , la media del tiempo de llamadas en espera. La fórmula calcula la probabilidad de bloqueo en una pérdida del sistema, si un requerimiento no es atendido inmediatamente cuando trata de utilizar un recurso, y este es abortado. Por lo tanto no son encolados. El bloqueo ocurre cuando hay un nuevo requerimiento de recursos, pero todos los servidores ya están ocupados. La ecuación 3.27 para el modelo Erlang B asume que el tráfico que es bloqueado se libera inmediatamente [35].

$$B(N, A) = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{i=0}^N \frac{A^i}{i!}} \quad (3.27)$$

Donde:

- $B$  es la probabilidad de bloqueo
- $N$  es el número de recursos como servidores o canales.
- $A = \lambda h$  es la cantidad de tráfico entrante expresado en Erlangs

La fórmula Erlang B se aplica a los sistemas con pérdidas, tales como sistemas telefónicos tanto fijos como móviles, que no ofrecen almacenamiento de llamadas (no permiten dejar la llamada "en espera"). Se asume que las llegadas de llamadas pueden ser modeladas por un proceso de Poisson (proceso de sucesos independientes), pero es válida para cualquier distribución estadística de tiempos entre llamadas.

### 3.7.3 Análisis de tráfico para una célula

En la sección 3.2.2 se determinó el número de canales simultáneos que una célula UMTS puede manejar. Basado en dichos resultados se puede determinar la densidad de tráfico que puede soportar una célula con una determinada probabilidad de bloqueo.

A continuación se determinará el tráfico en Erlangs en el enlace ascendente para diferentes tasas de transmisión en un ambiente de macro células, los valores de  $\gamma_b$  utilizados son los indicados en la sección 2.6, además consideraremos una carga del 50% pues para este valor el margen de interferencia tiene el máximo valor tolerable que es de 3 dB para garantizar un servicio adecuado en etapas de implementación iniciales. Se asumirá que el tráfico promedio de cada usuario es de 15 mili Erlangs a fin de establecer el número de usuarios por sector, el resto de parámetros considerados se muestran en la tabla 3.29 y los resultados en las tablas 3.30 y 3.31.

**Tabla 3. 29.** Parámetros considerados para el cálculo del tráfico en una célula (*uplink*)

Parámetro	Valor
Factor de carga $n_{UL}$ (%) ( <i>Uplink</i> )	50 %
Probabilidad de bloqueo	1 %
Tráfico un usuario [Erl]	0,015
$\bar{i}$	0,65

**Tabla 3.30.** Cálculos de tráfico y número de usuarios en el *uplink* (Propagación estática)

Tasa de transmisión (kbps)	Canales por Célula ( $N$ )	Tráfico [Erl]	Número de usuarios
12,2	53	40,6	2707
64	13	6,6	440
128	8	3,1	207
384	3	0,45	30

**Tabla 3.31.** Cálculos de tráfico y número de usuarios en el *uplink* (Propagación multitrayectoria)

Tasa de transmisión (kbps)	Canales por Célula ( $N$ )	Capacidad con bloqueo duro [Erl]	Número de usuarios
12,2	33	22,9	1527
64	8	3,1	207
128	5	1,35	90
384	2	0,15	10

A fin de obtener el tráfico en Erlangs para el *downlink* para diferentes tasas de transmisión en un ambiente de macro células se considerará una carga del 75% que es un valor razonable para este enlace [36].

**Tabla 3.32.** Parámetros considerados para el cálculo del tráfico en una célula (*downlink*)

Parámetro	Valor
Factor de carga $n_{UL}$ (%) ( <i>Uplink</i> )	75 %
Probabilidad de bloqueo	1 %
Tráfico un usuario [Erl]	0,015
$\bar{i}$	0,65

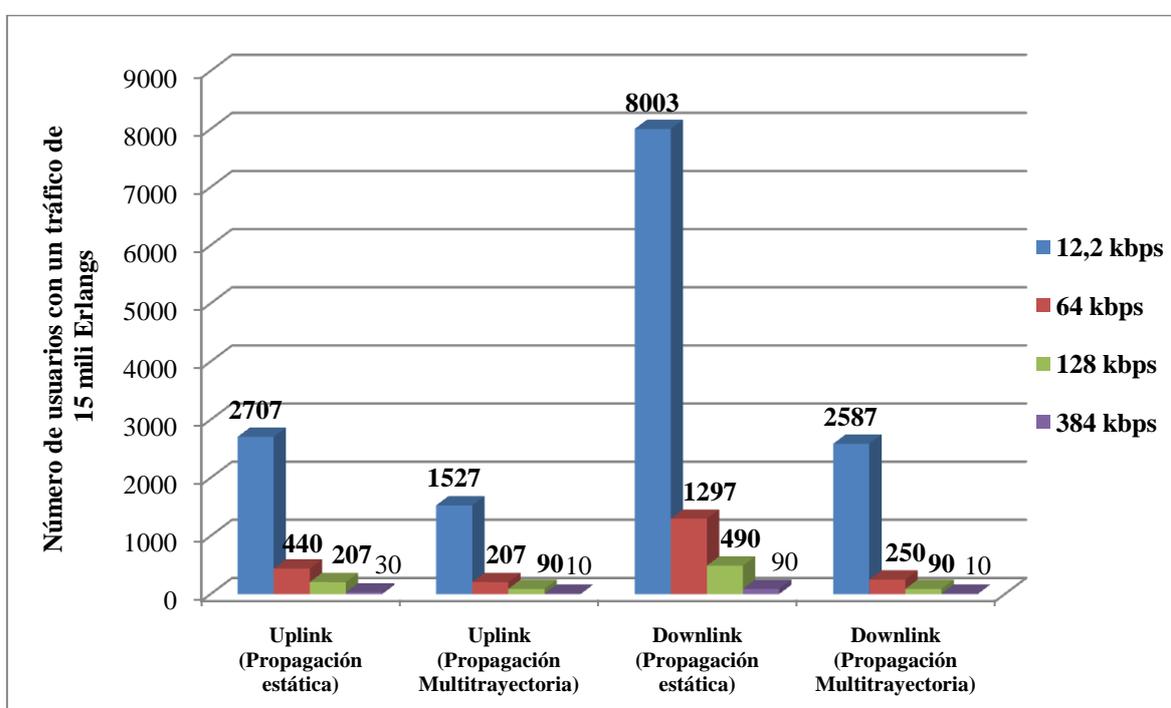
**Tabla 3.33.** Cálculos de tráfico y número de usuarios en el *downlink* (Propagación estática)

Tasa de transmisión (kbps)	Canales por Célula ( $N$ )	Capacidad con bloqueo duro [Erl]	Número de usuarios
12,2	138	120,05	8003
64	29	19,45	1297
128	14	7,35	490
384	5	1,35	90

**Tabla 3. 34.** Cálculos de tráfico y número de usuarios en el *downlink* (Propagación multitrayectoria)

Tasa de transmisión (kbps)	Canales por Célula ( $N$ )	Capacidad con bloqueo duro [Erl]	Número de usuarios
12,2	51	38,8	2587
64	9	3,75	250
128	5	1,35	90
384	2	0,15	10

En la figura 3.23 se resume el número total de usuarios que podrían estar dentro de la célula considerando un tráfico de 15 mili Erlangs tanto para el *downlink* como para el *uplink*.

**Figura 3.23** Número de usuarios con un tráfico de 15 mili Erlangs soportados en una célula

## **CAPÍTULO 4**

### **CASO DE ESTUDIO OPERADOR DE SERVICIO MÓVIL AVANZADO**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

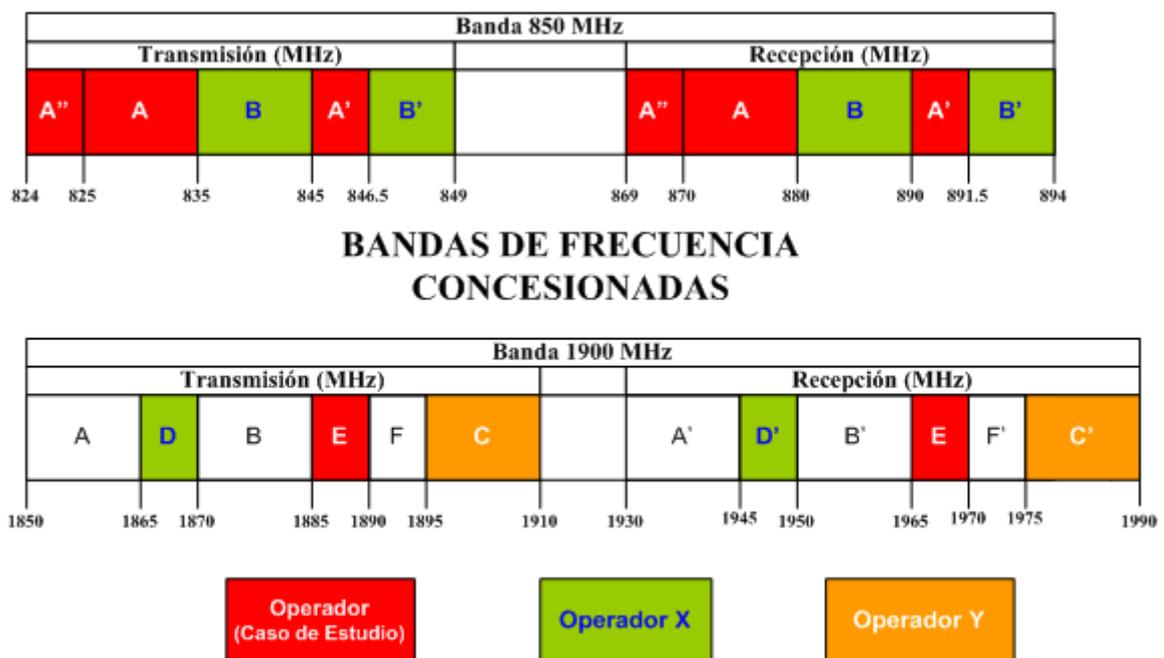
Una vez que se han obtenido resultados teóricos correspondientes a la eficiencia espectral, capacidad de una célula y demás parámetros que permiten realizar el planeamiento de una red móvil de tercera generación, se puede considerar como un gran aporte realizar un caso de estudio, el mismo que permitirá emplear los resultados conseguidos en el capítulo anterior para dimensionar la capacidad de la red en función de parámetros como el número de estaciones base utilizadas, la cobertura de las mismas, potencia de transmisión empleada y el ancho de banda disponible por el operador de la red en la zona de estudio.

Para el estudio de la red del Operador de Servicio Móvil Avanzado (SMA) se considerarán dos casos particulares. En el primer caso se tendrá en cuenta la situación actual de los operadores dentro del Ecuador, es decir, se evaluará la capacidad de la red teniendo en cuenta parámetros como las tasas de transmisión para los servicios ofertados, los equipos terminales utilizados y como factor adicional se analizarán los efectos sobre la red UMTS debido a la coexistencia de la misma con la tecnología de segunda generación GSM. Dentro del segundo caso de estudio se determinará la capacidad del sistema con miras al futuro, es decir, considerando que todo el ancho de banda disponible o su gran mayoría será empleado para los servicios de tercera generación. Para el análisis, adicionalmente se considerará la presencia de otros operadores de SMA lo que permitirá analizar la interferencia que éstos producen sobre la red de estudio y la manera de evitarla.

## 4.2 PARÁMETROS CONSIDERADOS PARA EL OPERADOR DE SERVICIO MÓVIL AVANZADO

### 4.2.1 Distribución del Espectro Radioeléctrico disponible

El Operador de prueba posee una concesión de frecuencias con un ancho de banda total disponible de 35 MHz, dicho ancho de banda se encuentran distribuido según la figura 4.1.



**Figura 4.1.** Bandas de frecuencia concesionadas para los Operadores de Servicio Móvil Avanzado [37]

Adicionalmente se considerará la presencia de 2 operadores de SMA adicionales al operador del caso de estudio. La presencia de los operadores A y B permitirá analizar la interferencia que sus redes producen y las maneras de evitarla.

Como se mencionó se analizará un caso en el que el operador de prueba tiene implementada la tecnología de segunda generación GSM, para lo cual se considerará la distribución del espectro radioeléctrico mostrada en la figura 4.2, en la cual se distribuye el espectro disponible para las tecnologías 2G y 3G únicamente para la banda utilizada para

la transmisión pues en la parte de recepción la distribución es similar. Nótese adicionalmente que se han considerado las bandas de guarda respectivas.

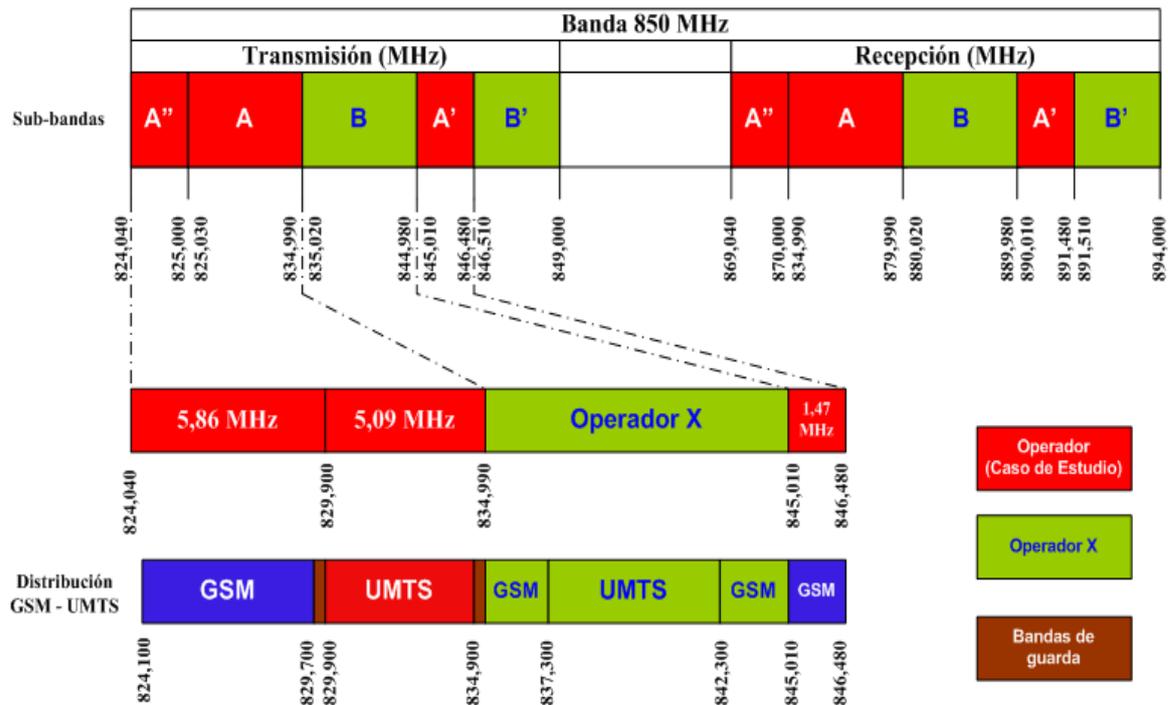


Figura 4.2. Distribución del espectro radioeléctrico disponible para las tecnologías 2G y 3G [37]

## 4.2.2 Equipos utilizados

### *Estación Base (Nodo B)*

Para el caso del operador de prueba se considerará que en lugar de una estación base tradicional se utilizará una *Estación Base Distribuida* (DBS) [37], la cual se caracteriza por que divide los transceptores de radio frecuencia del resto de la estación base y los reubica junto a la antena asociada respectiva lo que permite que la información desde y hacia la antena se pueda manejar sin mayores pérdidas de potencia. Los datos digitales banda base son transportados entre la central de procesamiento banda base ubicada en la estación base central y los transceptores de RF ubicados remotamente a través de una fibra óptica lo que no produce ningún tipo de pérdidas. Las figuras 4.3 y 4.4 muestran las diferencias entre una estación base tradicional y una estación base distribuida.

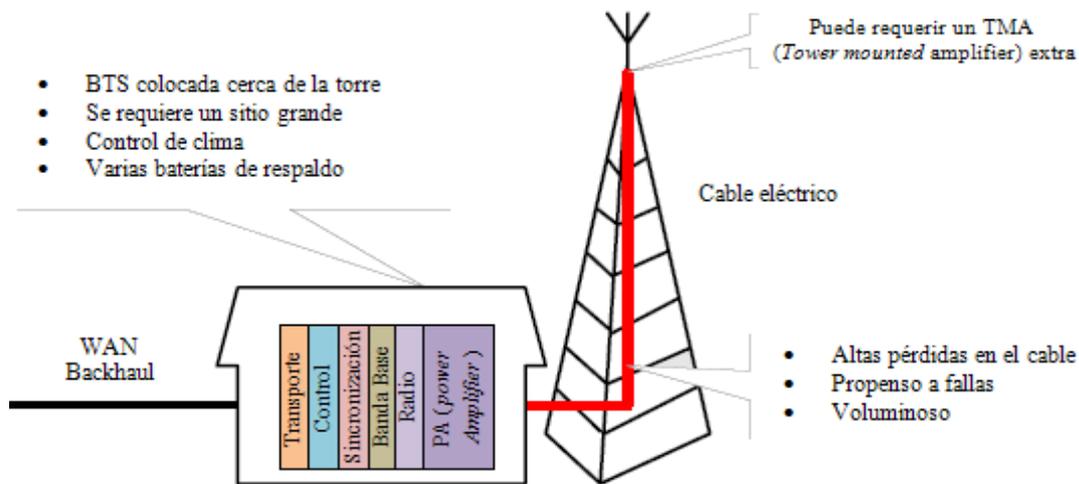


Figura 4. 3 Estación base tradicional [38]

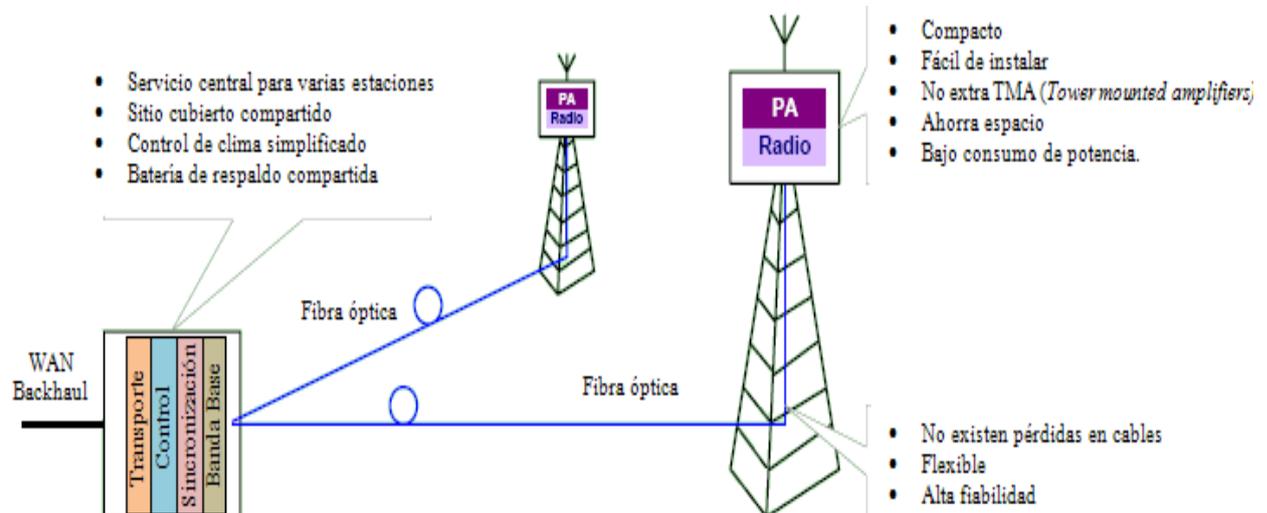


Figura 4.4. Estación base distribuida [38]

Los equipos que componen el Sistema Distribuido de nodos B para el operador de prueba son del fabricante HUAWEI modelo “DBS 3800” [37] el mismo que se compone de dos elementos básicamente: El BBU-3806 (*Baseband Unit*) y la RRU-3801C (*Radio Remote Unit*) [39].

El BBU-3806 es la unidad que realiza el procesamiento de los datos en banda base, dejando así la parte de radio frecuencia a la RRU. La BBU gestiona y controla hasta 3 RRUs mediante fibra óptica y por medio del equipo de transmisión se conecta al RNC que

gestiona dicho Nodo B utilizando múltiples interfaces como E1/T1, E3/T3, STM-1 y *Fast Ethernet*.



**Figura 4.5.** BBU- 3806 (Unidad Banda Base) [39]

La RRU-3801C es la unidad exterior responsable de la parte de radio frecuencia, que se conecta a las antenas mediante cable RF. Como norma general se instala lo más cercano posible a las antenas de radio con el fin de que la atenuación de la señal sea mínima. La potencia máxima de salida de la RRU es de 40 Watts y se conecta a la BBU a través de una manguera que contiene 4 fibras ópticas.



**Figura 4.6.** RRU-3801C (Unidad de potencia y radio frecuencia) [39]

**Tabla 4.1.** Especificaciones técnicas equipo Huawei DBS-3800 [39]

Parámetro	
Rango de frecuencias	850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz, 2100 MHz.
Número de células	12 células
Número de sectores	6 sectores
Peso	BBU: 5 kg ; RRU: 20kg
Potencia de salida	40 W máximo (omni), 20 W (sectores)
Consumo de potencia máximo	BBU: 60 W, RRU: 40 W
Sensibilidad del receptor	-126,2 dBm
Fuente de alimentación	BBU:24VDC/-48VDC, RRU: -48VDC/220V AC
Soporta	HSPA, Diversidad en la transmisión.

### Equipos terminales (UE)

Para los análisis posteriores se emplearán cuatro equipos presentes en el mercado ecuatoriano con la tecnología UMTS. Dos de ellos son equipos móviles celulares y los restantes son módems que permiten brindar servicio de internet móvil de alta velocidad. Las especificaciones técnicas de los equipos se muestran en la tabla a continuación.

**Tabla 4.2.** Equipos terminales empleados por el operador de prueba

	 <b>Nokia 5800 Xpress Music</b> [40]	 <b>Nokia E-71</b> [41]	 <b>Módem Sony Ericsson MD300</b> [42]	 <b>Módem Huawei E-160</b> [43]
<b>Potencia de transmisión</b>	+21 dBm	+21 dBm	+24 dBm	+24 dBm
<b>Sensibilidad</b>	-115 dBm	-115 dBm	-115 dBm	-115 dBm
<b>Rango de frecuencias</b>	UMTS/HSDPA 850/1900 MHz GSM/EDGE 850/900/1800/1900 MHz	UMTS/HSDPA 850/1900 MHz EGSM 850/900/1800/1900 MHz	UMTS/HSDPA 850/1900/2100 MHz EDGE 850/900/1800/1900 MHz GPRS 850/900/1800/1900 MHz	UMTS/HSDPA 850/1900/2100MHz GPRS/EDGE 850/900/1800/1900M Hz
<b>Tasas de transmisión máximas (DL/UL)</b>	UMTS 384/384 kbps HSDPA cat 6 3,6 Mbps (DL) GPRS/EDGE 296/177 kbps	UMTS 384/384 kbps HSDPA class 6 3,6 Mbps/384 kbps GPRS 100/60 kbps EDGE 296/177,6 kbps	UMTS 384 /384 kbps HSDPA 3,6 Mbps/384 kbps 1,2 Mbps / 384 kbps (Ecuador) GPRS 85,6/42,8 kbps EDGE 247,4/123,7kbps	UMTS 384 /384 kbps HSDPA 3,6 Mbps/384 kbps 1,2 Mbps / 384 kbps (Ecuador)
<b>Tecnologías soportadas</b>	GPRS/EDGE, UMTS, HSDPA	GPRS/EDGE, UMTS, HSDPA	GPRS/EDGE, UMTS, HSDPA	GPRS/EDGE, UMTS, HSDPA

### 4.3 INTERFERENCIA DEBIDO A LA COEXISTENCIA CON OTRAS TECNOLOGÍAS

Para determinar la interferencia que se produce en los sistemas UMTS debido a la coexistencia con la tecnología GSM y sus respectivas evoluciones o con otras redes UMTS se considerará el reporte técnico 3GPP TR 25.816 (*Release 7*), en el cual se presentan escenarios de simulaciones para la coexistencia entre UMTS y GSM realizadas por diferentes fabricantes de equipos y bajo diferentes ambientes en las bandas de 850 MHz y 900 MHz. Los resultados obtenidos se basan en dos parámetros básicamente, los cuales se describen a continuación:

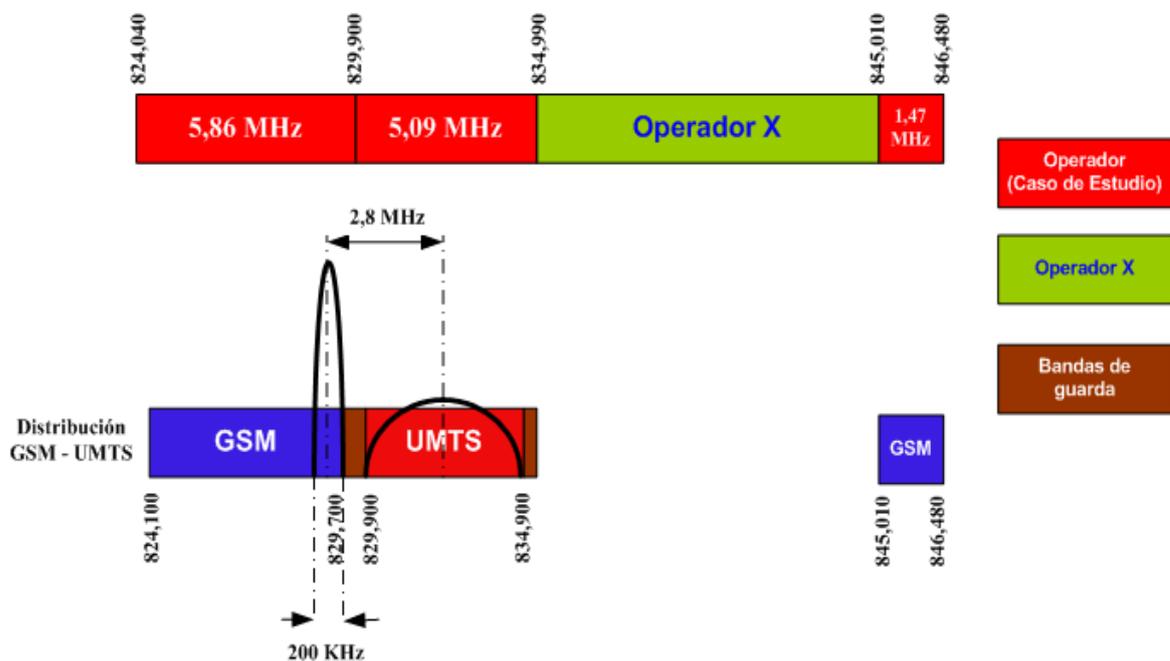
- *ACLR (Adjacent Channel power Leakage Ratio)*. - Es una medida del desempeño de la transmisión para WCDMA. Se define como la relación entre la potencia transmitida para la potencia medida después de un filtro receptor en el canal de RF adyacente. [44]
- *ACS (Adjacent Channel Selectivity)*.- Es una medida de la capacidad de un receptor para procesar una señal deseada pero rechazando las señales fuertes en una frecuencia de un canal adyacente. Se define como la relación entre la atenuación del filtro receptor en la frecuencia de trabajo para la atenuación del filtro receptor en la frecuencia del canal adyacente [44].

Los resultados de las simulaciones y pruebas realizadas por los operadores se basan básicamente en función de otro parámetro conocido como *ACIR (Adjacent Channel Interference Ratio)*, que es la relación de la potencia que se desea para la potencia de la interferencia proveniente de canales adyacentes. El ACIR se define mediante la siguiente expresión [45]:

$$ACIR = \frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}} \quad (4.1)$$

A fin de elegir los valores adecuados para los parámetros ACLR y ACS el reporte técnico 3GPP considerado establece como factor importante la separación que existe entre

la frecuencia central de la banda UMTS y la frecuencia central del primer canal adyacente de GSM. Cuando los sistemas GSM y UMTS trabajan de una manera no coordinada (BTS en sitios distintos) es recomendable utilizar una separación de frecuencias centrales de 2,8 MHz o mayor, caso contrario la separación debe ser de 2,6 MHz o mayor [46]. Para el operador del prueba existe una separación de 2,8 MHz tal como se muestra en la figura 4.7, considerando que las radio bases de GSM y UMTS trabajan de una manera coordinada (BTS ubicadas en los mismos sitios).



**Figura 4.7.** Separación entre la frecuencia central de UMTS y GSM en bandas adyacentes [37]

A continuación se evalúan las pérdidas en la capacidad del sistema debido a la coexistencia con GSM y UMTS bajo diferentes escenarios.

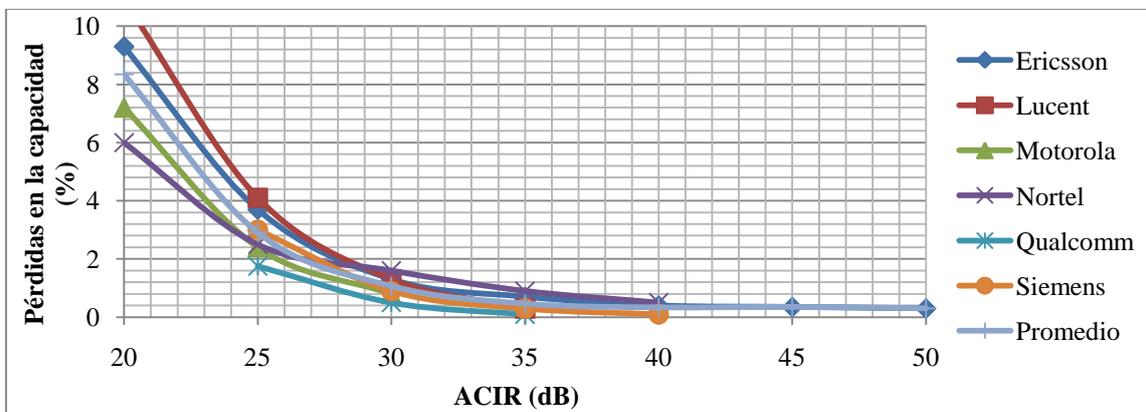
#### 4.3.1 Escenario 1: GSM– UMTS en operación no coordinada

Para este escenario los valores de ACLR y ACS se indican en la tabla 4.3 y junto a ellos se muestra el valor de ACIR calculado utilizando la ecuación 4.1.

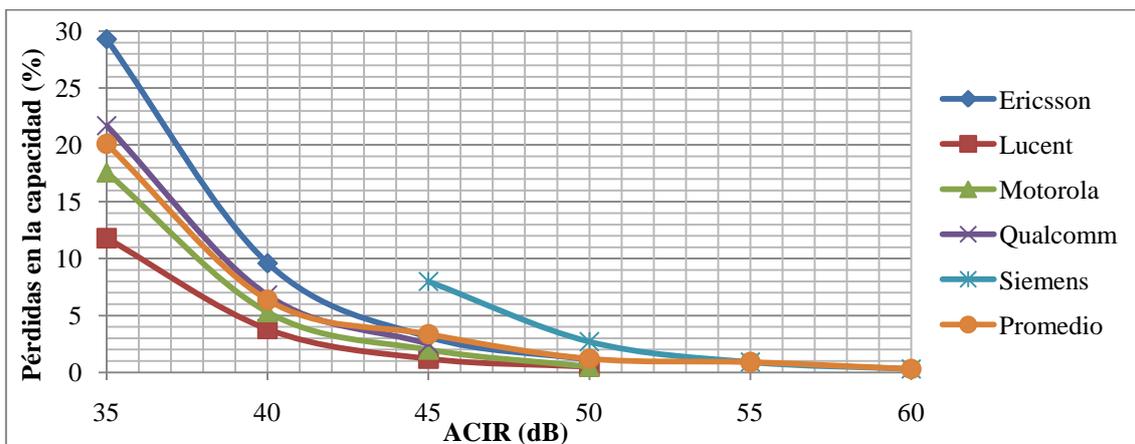
**Tabla 4.3.** ACLR, ACS y ACIR para operación no coordinada entre GSM y UMTS [45]

Separación de frecuencias	2.8 MHz	
	UTRA-FDD (BS)	UTRA-FDD (UE)
ACLR (dB)	50	31,3
ACS (dB)	51,3	30,5
ACIR (dB)	43,1 ( <i>uplink</i> )	30,5 ( <i>downlink</i> )

Para un entorno con la utilización de macro células con operación no coordinada, diferentes fabricantes obtuvieron los resultados mostrados en la figuras 4.8 y 4.9 para los porcentajes de pérdida de la capacidad de la célula en función del ACIR debido a la interferencia producida por un canal adyacente con tecnología GSM.



**Figura 4. 8** Pérdidas en la capacidad de una célula UMTS en el *downlink* debido a la interferencia proveniente de GSM (Operación no coordinada) [45]



**Figura 4. 9** Pérdidas en la capacidad de una célula UMTS en el *uplink* debido a la interferencia proveniente de GSM (Operación no coordinada) [45]

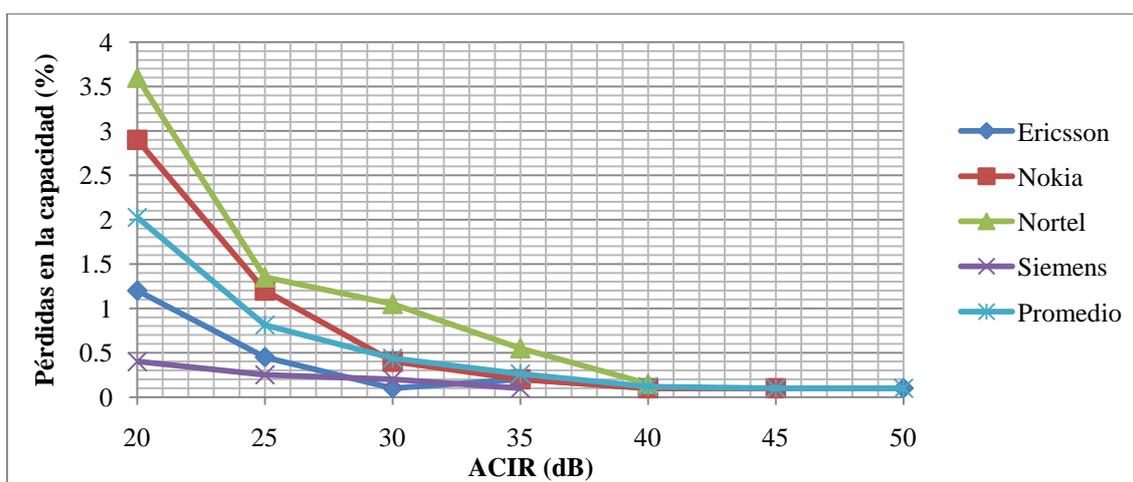
Debido a que para el caso de estudio considerado emplearemos equipos Huawei y este fabricante no ha presentado simulaciones para la 3GPP se empleará el promedio de los resultados presentados en las figuras 4.8 y 4.9 para el análisis, dichos valores se muestran en la tabla 4.4. Se debe tener muy en cuenta que el impacto de la coexistencia de GSM con UMTS no debe superar el 5% de pérdidas en la capacidad para este último.

**Tabla 4.4.** Pérdida de la capacidad en UMTS debido a la interferencia proveniente de GSM (Operación no coordinada)

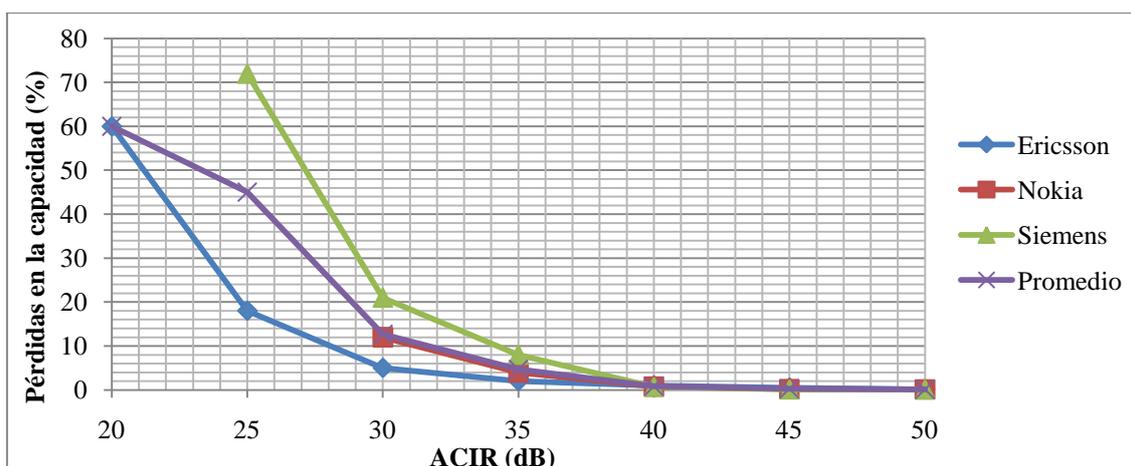
	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
<b>ACIR (dB)</b>	30,5	43,1
<b>Pérdida de la capacidad UMTS debido a la interferencia proveniente de GSM (%)</b>	1	3,3

#### 4.3.2 Escenario 2: GSM – UMTS en operación coordinada

Para un entorno de macro células de las tecnologías GSM y UMTS en operación coordinada diferentes fabricantes también han realizado diversas pruebas con el objetivo de determinar las pérdidas en la capacidad del sistema UMTS en función del ACIR. Los resultados obtenidos por los fabricantes de equipos UMTS se muestran en las figuras a continuación.



**Figura 4.10.** Pérdidas en la capacidad de una célula UMTS en el *downlink* debido a la interferencia proveniente de GSM (Operación coordinada) [45]



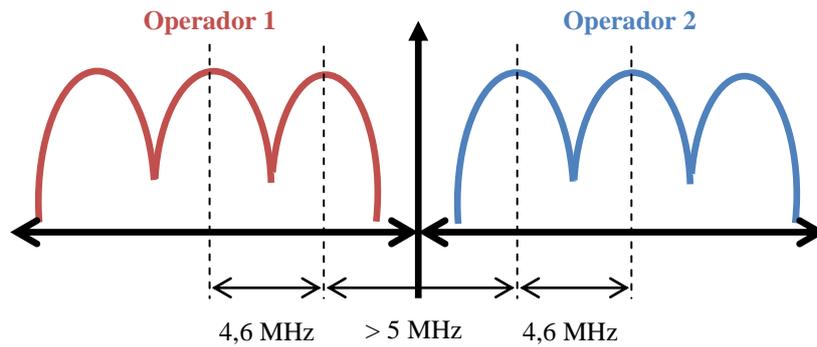
**Figura 4.11.** Pérdidas en la capacidad de una célula UMTS en el *uplink* debido a la interferencia proveniente de GSM (Operación coordinada) [45]

**Tabla 4.5.** Pérdida de la capacidad en UMTS debido a la interferencia proveniente de GSM (Operación coordinada)

	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
ACIR (dB)	30,5	43,1
Pérdida de la capacidad UMTS debido a la interferencia proveniente de GSM (%)	0,4	0,3

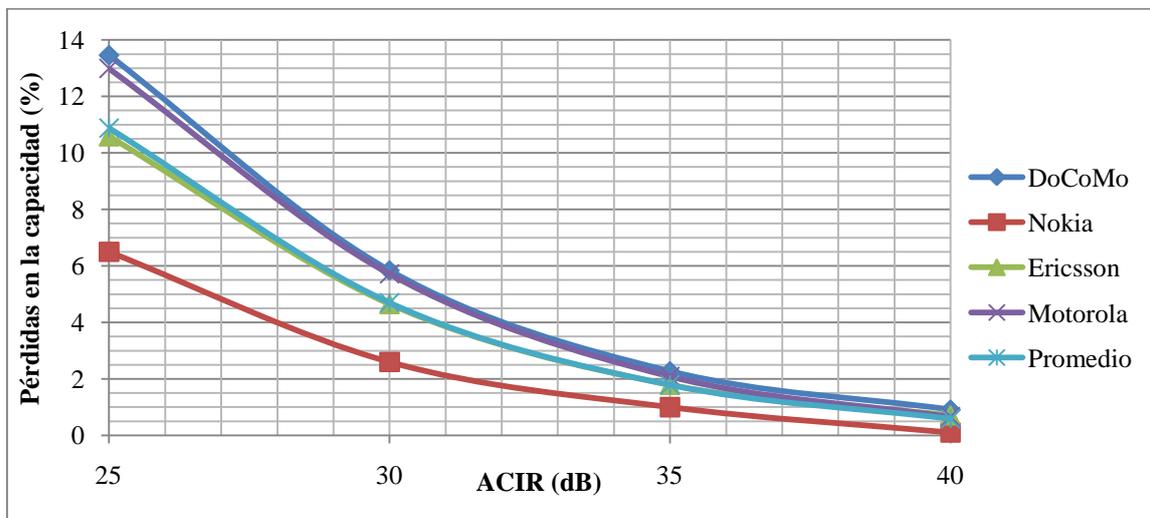
### 4.3.3 Escenario 3: Interferencia debido a la coexistencia con otras redes UMTS – Operación no coordinada

Es importante tener en cuenta la interferencia que se produce debido a la existencia de redes UMTS que trabajan en canales adyacentes debido a que la interferencia que producen afecta la capacidad del sistema de interés debido a que no se pueden emplear bandas de guarda lo suficientemente grandes a causa de lo limitado que es el espectro radioeléctrico. De manera similar con GSM se emplearán simulaciones realizadas por varios fabricantes de equipos UMTS. Dichas simulaciones se realizaron para una separación entre frecuencias centrales de las bandas UMTS de 5 MHz [45], tal como se muestra en la figura 4.12, pues se considera que se trata de redes de operadores diferentes y por tanto trabajan de una manera no coordinada.



**Figura 4.12.** Separación de frecuencias centrales entre portadoras UMTS [47]

Las simulaciones según el reporte técnico 3GPP TR 25.942 para un ambiente de macro células y un nivel de interferencia medio se muestran en las figuras 4.13 y 4.14, no se consideraron las simulaciones para el peor caso (máxima interferencia) pues éste es muy poco probable a darse en la realidad ya que considera que las estaciones base del segundo sistema se encuentran localizadas justo en el borde de las células del sistema analizado.



**Figura 4.13.** Pérdidas en la capacidad de una célula UMTS en el *downlink* debido a la interferencia proveniente de otro operador UMTS (Macro células) [45]

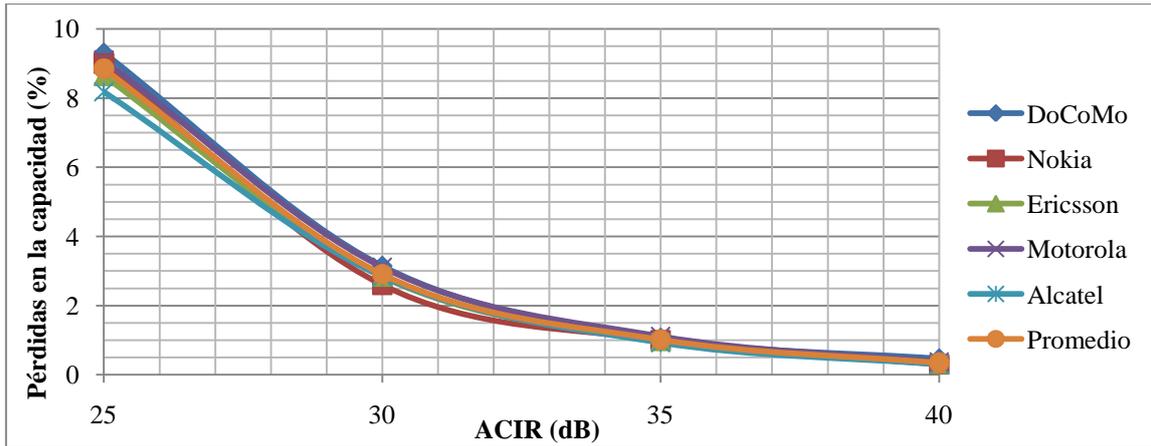


Figura 4.14. Pérdidas en la capacidad de una célula UMTS en el *uplink* debido a la interferencia proveniente de otro operador UMTS (Macro células) [45]

Los valores de ACLR, ACS y el ACIR determinando mediante la ecuación 4.1 se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4. 6 ACLR, ACS y ACIR para operación no coordinada entre redes UMTS [45]

	<i>UTRA-FDD (BS)</i>	<i>UTRA-FDD (UE)</i>
<b>ACLR (dB)</b>	45	33
<b>ACS (dB)</b>	46,3	33
<b>ACIR (dB)</b>	32,8 ( <i>uplink</i> )	32.7 ( <i>downlink</i> )

Tabla 4.7. Pérdida de la capacidad UMTS debido a la interferencia proveniente de otra red UMTS

	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
<b>ACIR (dB)</b>	32,7	32,8
<b>Pérdida de la capacidad UMTS debido a la interferencia proveniente de otra red UMTS (%)</b>	2,2	1,6

Cuando un operador emplea varias frecuencias portadoras para su sistema UMTS, éstas a pesar de ser adyacentes no crean interferencia entre sí, debido a que el Nodo B está diseñado para trabajar con un número determinado de frecuencias y en cada una de ellas asigna códigos diferentes y además permite que la separación entre frecuencias centrales entre portadoras sea de 4,6 MHz tal como se muestra en la figura 4.12. En este caso las frecuencias portadoras además trabajan de una manera coordinada.

### 4.3.4 Mecanismo para evitar la interferencia de otros operadores UMTS y disminuir la interferencia proveniente de GSM

Con el objetivo de eliminar la interferencia que producen otros operadores y si el operador posee un bloque con ancho de banda de 10MHz se debe colocar los 5 MHz destinados para UMTS a manera de “*sándwich*” entre las portadoras de GSM.

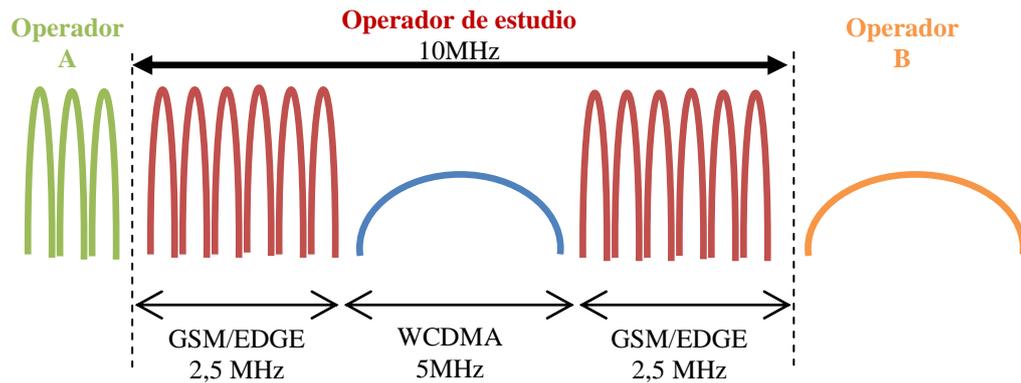


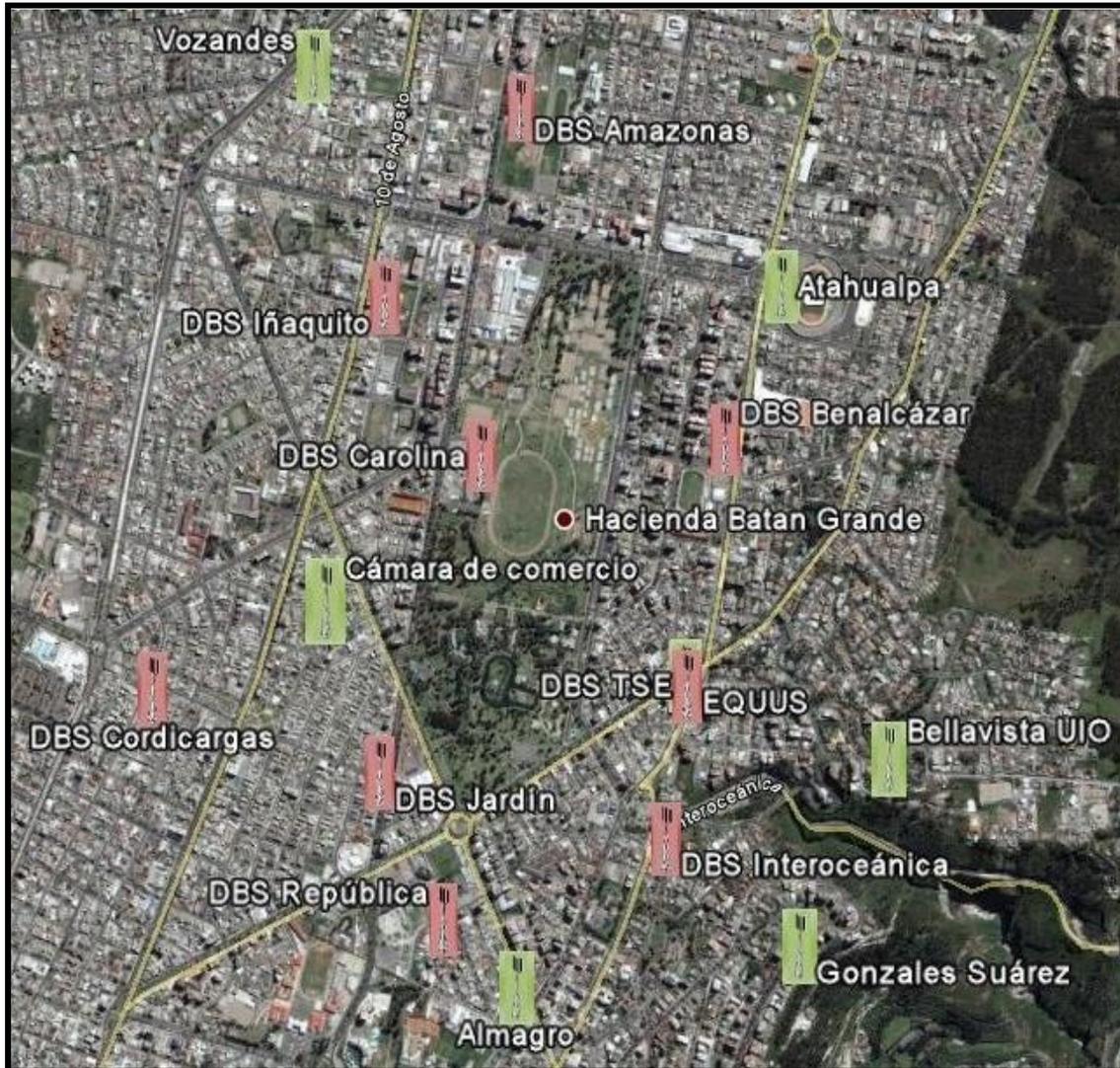
Figura 4.15. Distribución de frecuencias tipo *sándwich* [45]

Adicionalmente a fin de reducir al máximo la interferencia producida por la red GSM del mismo operador, se debe utilizar las portadoras de una manera coordinada, es decir colocando las estaciones base de WCDMA y GSM en la misma ubicación geográfica. Gracias a estas dos técnicas las pérdidas de la capacidad tanto para el *downlink* como para el *uplink* no superarán el 0,3%.

## 4.4 CASO DE ESTUDIO

### 4.4.1 Escenario considerado para el análisis

El área de estudio se la realizará en una zona urbana de la ciudad de Quito, en la cual el empleo de transmisión de datos con tecnología UMTS es muy frecuente por parte de los usuarios. La zona de análisis constituye el parque la Carolina y alrededores, un área total aproximada de 10  $km^2$ , este sector además se caracteriza por la gran afluencia de personas debido a que se trata de una zona comercial.



**Figura 4.16.** Escenario considerado para el caso de estudio (Imagen de *Google Earth*)

En la figura 4.16 las estaciones base de color rojo forman parte de la red del operador de prueba mientras que las estaciones de color verde constituyen parte de la red de otro operador con tecnología UMTS en la banda de 850 MHz. El detalle de las estaciones base que pertenecen al operador de prueba consideradas para el análisis se muestra en la tabla a continuación.

**Tabla 4.8.** Ubicación de las estaciones base en la zona de estudio [48]

Nro.	Nombre de la Radio Base	Sectores	Dirección	Latitud	Longitud	Ganancia [dBi]	Altura Base – Antena [m]	Potencia de transmisión [dBm]
1	AMAZONAS	3	Amazonas 4430 y Villalengua Edif. Amazonas 100	00° 10' 21,65'' S	78° 29' 04,34'' W	17	18	43,02
2	INAQUITO	3	Iñaquito N3639 y Corea	00° 10' 39,54'' S	78° 29' 17,41'' W	17	18	43,02
3	BENALCAZAR	3	Av. 6 de Diciembre y Pasaje los Naranjos	00° 10' 52,69'' S	78° 28' 44,40'' W	17	18	43,02
4	CAROLINA	3	Centro de Exposiciones Quito. Amazonas y Atahualpa.	00° 10' 53,58'' S	78° 29' 07,94'' W	17	18	43,02
5	TSE	2	Av. Eloy Alfaro y Av. Seis de Diciembre	00° 11' 15,4'' S	78° 28' 48,10'' W	17	18	43,02
6	CORDICARGAS	3	Av. Antonio de Ulloa N31 y Av. Mariana de Jesús, Edif. ABB,	00° 11' 15,71'' S	78° 29' 39,12'' W	17	18	43,02
7	JARDIN	3	Av. Mariana de Jesús y Amazonas, edif. Hostal El Jardín	00° 11' 23,40'' S	78° 29' 17,70'' W	17	18	43,02
8	INTEROCEAN	3	Calle Boussingault 122 y Av. 6 de Diciembre Edif. Interoceánica (Mezzanine)	00° 11' 29,32'' S	78° 28' 50,19'' W	17	18	43,02
9	REPUBLICA	1	Calle Pradera #432. A entre República y San Salvador	00° 11' 36,66'' S	78° 29' 11,52'' W	16	18	43,02

#### 4.4.2 Análisis considerando la situación actual del operador

##### *Capacidad de un sector*

A fin de realizar este análisis se considerará que el operador requiere servicios con tasas de transmisión máximas de 384 kbps cuando se utiliza únicamente tecnología UMTS y tasas de transmisión de hasta 1,2 Mbps cuando se emplea HSDPA, estos valores se toman en cuenta en función de los equipos terminales descritos en la sección 4.2.2. La carga para el *downlink* será de 90% mientras que para el *uplink* será del 50% ( $\rho_{UL} = 3dB$ ) pues en fases iniciales no es recomendable utilizar la capacidad del sistema al máximo ( $\rho_{UL} = 6 dB$ ) pues esto produciría pérdidas considerables en la capacidad de los sistemas GSM ubicados en bandas adyacentes.

Los parámetros empleados para determinar la capacidad de la célula se indican en la tabla 4.9. Los valores de  $\gamma_b$  utilizados son para un BLER del 1%.

**Tabla 4.9.** Parámetros utilizados para el caso de estudio [37]

Enlace	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
Tasa de transmisión (kbps)	384	384
$\gamma_b$ [dB]	5,7	3,2
$v_j$ (Factor de actividad )	1	1
$W$ [Mcps]	3,84	3,84
$i$ (Relación de potencia)	0,65	0,65
$\alpha$ (Ortogonalidad)	0,5	0,5

Empleando los datos presentados en la tabla 4.9 y las ecuaciones 3.15 y 3.16 según el caso, se determina el máximo número de canales simultáneos y el factor de carga para un solo usuario, los resultados se muestran en la tabla 4.10.

**Tabla 4.10.** Factor de carga y número de canales simultáneos para el *downlink* y el *uplink*

Enlace	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
Tasa de transmisión (kbps)	384	384
$n$ (Factor de carga) - Un usuario	$4,27 \times 10^{-1}$	$2,85 \times 10^{-1}$
Número de usuarios (CANALES)	2	2

Para determinar el *throughput* de la célula en función de las pérdidas que soporta cada enlace, el operador de estudio emplea los siguientes parámetros:

**Tabla 4.11.** Parámetros considerados para cálculo de las máximas pérdidas en el *downlink* y el *uplink* [37]

Enlace	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
BTS potencia/UE potencia (dBm)	43,02	21
Potencia Canales Comunes (W)	3,6	---
Figura de ruido [dB]	7	---
Ganancia antena BTS [dBi]	17	17
Ganancia antena UE [dBi]	0	0
Pérdidas en cables [dB]	2,2	2,2
Ganancia por <i>soft handover</i> [dB]	1,5	1,5
Margen de rápido desvanecimiento (Ganancia Macro diversidad) [dB]	1,7	3,8
<i>Slow fading (log normal fading)</i> [dB]	7,5	7,5
Margen de interferencia [dB]	10	3
Pérdidas por penetración en edificaciones [dB]	22	22
Sensibilidad del receptor [dBm]	-126,2	-115

En la tabla anterior se indica el parámetro *slow fading*, que constituye el desvanecimiento causado por obstáculos cercanos a las estaciones base. Este parámetro es un factor importante en nuestro análisis debido a la presencia de edificaciones en la zona de estudio. Las pérdidas que se producen debido a este tipo de desvanecimiento se modelan empleando una distribución log-normal, de ahí también conocido como desvanecimiento log-normal. El valor de 7,5 dB para este parámetro corresponde a un 95% de cobertura en la célula [49].

Empleando los datos de la tabla 4.11, la ecuación 3.23 para determinar las pérdidas en el *downlink* y la ecuación 3.17 para calcular el *throughput* de la célula se obtienen los resultados mostrados en la siguiente tabla.

**Tabla 4.12.** Capacidad de un sector y máximas pérdidas tolerables para el *downlink*

$n_{DL}$ (%)	Canales simultáneos	<i>Throughput</i> (kbps)	Pérdidas máximas [dB]
90	2	800,78	128,87

Para el enlace ascendente de manera similar se emplearán los datos de la tabla 4.11, la ecuación 3.17 para calcular el *throughput* de la célula y la ecuación 3.26 para determinar las pérdidas en el enlace. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.13.

**Tabla 4.13.** Capacidad de un sector y máximas pérdidas tolerables para el *uplink*

$n_{UL}$ (%)	Canales simultáneos	<i>Throughput</i> (kbps)	Pérdidas máximas [dB]
50	2	666,58	123,59

Se debe ahora tomar en cuenta que el operador de prueba posee adicionalmente tecnología de segunda generación (GSM) y esta se encuentra trabajando de una manera coordinada con el sistema UMTS, sin embargo se pudo verificar en la sección 4.3.2 que ésta coexistencia produce pérdidas en la capacidad del sistema que a pesar de ser pequeñas deben ser tomadas en cuenta. La presencia de otro operador con tecnología GSM en una banda adyacente crea pérdidas adicionales en la capacidad debido a que trabaja de una manera no coordinada con la red del operador de prueba, estas pérdidas se detallan en la sección 4.3.1. Por lo tanto la capacidad de la célula tanto para el *downlink* como para el *uplink* disminuirá según lo indicado en la tabla 4.14.

**Tabla 4.14.** Capacidad de un sector considerando la interferencia proveniente de redes en bandas adyacentes

Enlace	Capacidad de un sector sin interferencia debido a otras redes (kbps)	Capacidad de un sector coexistente con GSM <i>Downlink: -0.4%</i> <i>Uplink: -0.3%</i> (kbps)	Capacidad de un sector coexistente con GSM y otro operador GSM <i>Downlink: -1%</i> <i>Uplink: -3.3%</i> (kbps)	Número de canales simultáneos
<i>Downlink</i> (Carga 90%)	800,78	797,58	789,60	2
<i>Uplink</i> (Carga 50%)	666,58	664,58	642,65	2

Para el caso de estudio y teniendo en cuenta que la célula se dividen en sectores y cada sector utiliza un amplificador de potencia de manera independiente, se puede determinar el *throughput* total en la zona de estudio, los resultados se muestran en la tabla 4.15.

**Tabla 4.15.** Capacidad total del conjunto de estaciones base analizadas

Nro.	Nombre de la Radio Base	Sectores	Downlink		Uplink	
			Usuarios simultáneos	Throughput total (kbps)	Usuarios simultáneos	Throughput total (kbps)
1	AMAZONAS	3	6	2368,8	6	1927,95
2	INAQUITO	3	6	2368,8	6	1927,95
3	BENALCAZAR	3	6	2368,8	6	1927,95
4	CAROLINA	3	6	2368,8	6	1927,95
5	TSE	2	4	1579,2	4	1285,30
6	CORDICARGAS	3	6	2368,8	6	1927,95
7	JARDIN	3	6	2368,8	6	1927,95
8	INTEROCEAN	3	6	2368,8	6	1927,95
9	REPUBLICA	1	2	789,60	2	642,65
		<b>Total</b>	<b>48</b>	<b>18950,4</b>	<b>48</b>	<b>15423,6</b>

### Área de cobertura de cada sector

Utilizando el modelo de propagación COST231-HATA descrito en el Anexo A1, podemos determinar el radio de un sector en función de las máximas pérdidas tolerables en cada enlace. Para ello se emplearán los parámetros mostrados en la tabla 4.16.

**Tabla 4.16.** Parámetros utilizados para el cálculo del radio de cada sector

Parámetro	Valor
$f_{central}$ (MHz)	Downlink: 832,4 MHz; Uplink: 877,4 MHz
Altura antena de la estación base (m)	18
Altura antena UE (m)	1,5

El área de cobertura de un sector está dada por la siguiente expresión [6]:

$$A_{sector} = \frac{3\sqrt{3}}{2} r_{célula}^2 \quad (4.2)$$

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.17.

**Tabla 4.17.** Radio de un sector y área de cobertura con una BTS

Enlace	Máximas pérdidas [dB]	Radio de cobertura de cada sector (km)	Área de cobertura de un sector ( $km^2$ )	Área de cobertura con una BTS $A_{BTS} = 3 \times A_{sector}$ ( $km^2$ )
Downlink	128,87	1,02	2,7	8,1
Uplink	123,59	0,71	1,31	3,93

### 4.4.3 Análisis a futuro

Se determinará la capacidad de una célula con miras al futuro, es decir, del ancho de banda que el operador tiene disponible la mayor parte será empleado para la tecnología UMTS. En este caso ya no se trata de una fase inicial de implementación de UMTS por lo tanto consideraremos la máxima capacidad para el *uplink*, es decir, cuando el margen de interferencia es igual a 6 dB que equivale a que el factor de carga sea igual al 75%.

#### *Distribución del espectro disponible*

Como paso inicial debemos determinar el número de portadoras UMTS que el operador puede manejar en el ancho de banda que tiene a su disposición. Se debe tener en cuenta que todas las portadoras van a trabajar de una manera coordinada (estaciones base en el mismo sitio) lo cual presenta dos grandes beneficios:

- La interferencia entre estas portadoras es relativamente baja lo que implica que las pérdidas en la capacidad sean casi nulas.
- Las frecuencias centrales entre portadoras pueden tener una separación mínima 4,6 MHz [47].

Para realizar el análisis de la capacidad propondremos el esquema de asignación de frecuencias mostrado en la figura 4.17. El operador de prueba tiene la capacidad de trabajar con tres portadoras UMTS, dos de ellas en la banda de 850 MHz y la tercera en la banda de 1900 MHz. Se optó por realizar una distribución de frecuencias utilizando el esquema tipo *sándwich* mencionado en la sección 4.3.4 para la banda de 850 MHz, pues de este modo se evita la interferencia proveniente de otros operadores en bandas adyacentes y además la capacidad del sistema disminuye únicamente en un 0,3%. En la banda de 1900 MHz no consideraremos pérdidas en la capacidad al no existir sistemas de telefonía móvil en las bandas adyacentes.

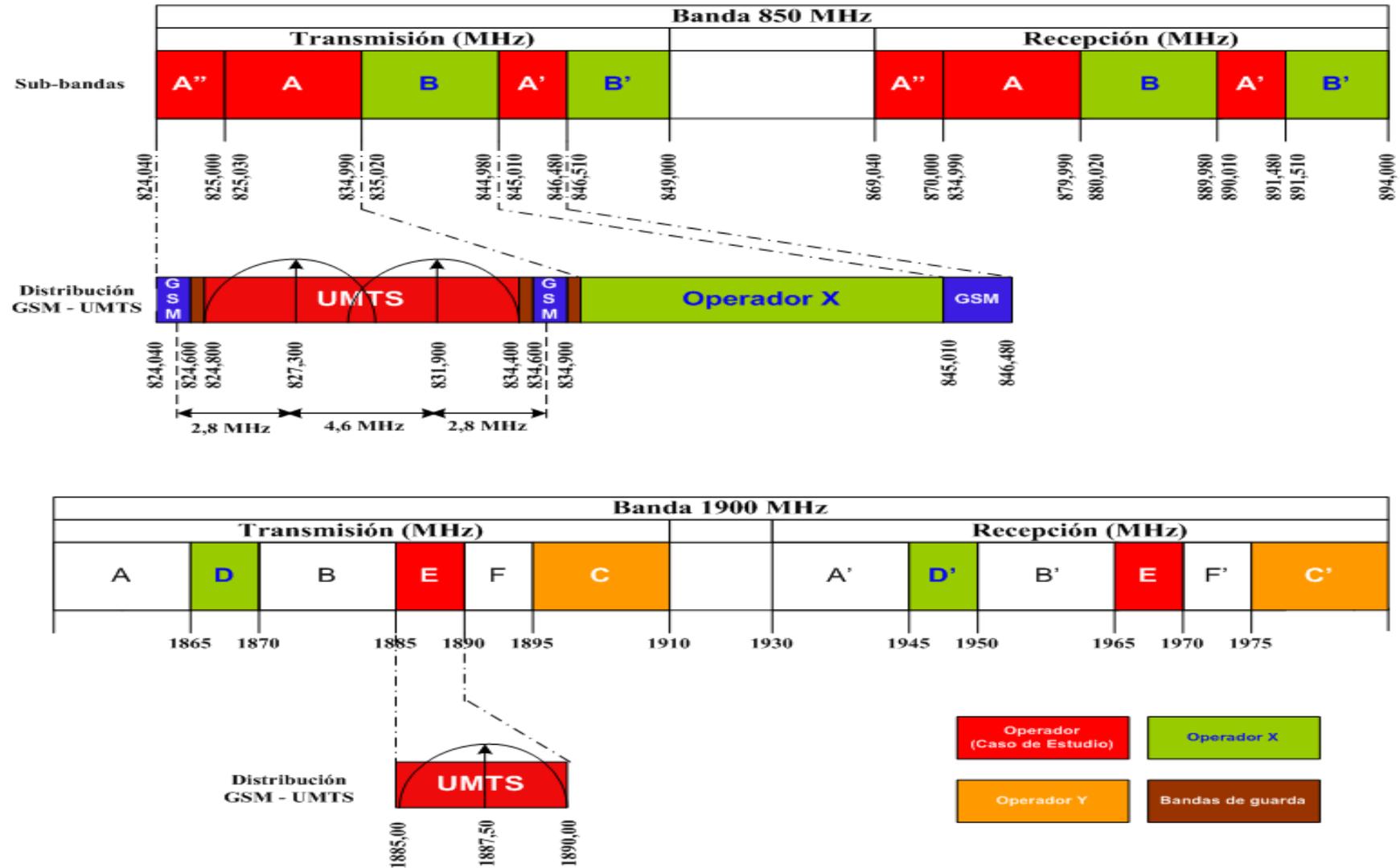


Figura 4.17. Distribución de frecuencias utilizando tres portadoras para la tecnología UMTS

A nivel de *hardware* el operador únicamente debe colocar dos RRU-3801Cs por cada sector, ya que cada uno de estos dispositivos maneja dos portadoras sin tener que variar la potencia de transmisión utilizada [39].

### Capacidad de un sector

Utilizando los parámetros de las tablas 4.9 y 4.11, se puede determinar la capacidad para un sector y las máximas pérdidas tanto para el *downlink* como para el *uplink*, los resultados se muestran en la tabla a continuación.

**Tabla 4.18.** Capacidad de un sector y máximas pérdidas para el *downlink* y el *uplink* considerando una portadora UMTS

$n_{DL}$ (%)	<i>Downlink</i>			$n_{UL}$ (%)	<i>Uplink</i>		
	Canales simultáneos	Throughput (kbps)	Pérdidas máximas [dB]		Canales simultáneos	Throughput (kbps)	Pérdidas máximas [dB]
<b>90</b>	2	800,78	128,87	<b>75</b>	3	999,87	120,58

La capacidad total de cada sector utilizando tres portadoras se muestra en la tabla 4.19 y la capacidad total del sistema analizado en la tabla 4.20.

**Tabla 4.19.** Capacidad de un sector utilizando tres portadoras UMTS

	<i>Downlink</i> (Carga 90%)	<i>Uplink</i> (Carga 75%)	
Capacidad de una portadora sin interferencia debido a otras redes (kbps)	800,78	999,87	a
Capacidad portadoras en la banda de 850 MHz considerando interferencia de canales GSM adyacentes -0.3% (kbps)	1596,76	1993,74	$b=2(a-a \times 0.003)$
Capacidad de cada sector: Capacidad portadoras en la banda de 850 MHz + Capacidad portadora en la banda de 1900 MHz (kbps)	<b>2397,54</b>	<b>2993,61</b>	a + b
Número de canales simultáneos	<b>6</b>	<b>8</b>	

**Tabla 4.20.** Capacidad total del conjunto de estaciones base analizadas considerando tres portadoras UMTS

Nro.	Nombre de la Radio Base	Sectores	Downlink		Uplink	
			Usuarios simultáneos	Throughput total (kbps)	Usuarios simultáneos	Throughput total (kbps)
1	AMAZONAS	3	18	7192,62	24	8980,83
2	INAQUITO	3	18	7192,62	24	8980,83
3	BENALCAZAR	3	18	7192,62	24	8980,83
4	CAROLINA	3	18	7192,62	24	8980,83
5	TSE	2	12	4795,08	16	5987,22
6	CORDICARGAS	3	18	7192,62	24	8980,83
7	JARDIN	3	18	7192,62	24	8980,83
8	INTEROCEAN	3	18	7192,62	24	8980,83
9	REPUBLICA	1	6	2397,54	8	2993,61
		<b>Total</b>	<b>144</b>	<b>57540,96</b>	<b>192</b>	<b>71846,64</b>

### Cobertura de cada sector

Utilizando los parámetros considerados en la tabla 4.16, el modelo de propagación COST231-HATA (Anexo A2) y la ecuación 4.2 se determina la siguiente cobertura para cada sector utilizando tecnología UMTS.

**Tabla 4.21.** Radio de un sector y área de cobertura de una BTS utilizando tres portadoras UMTS

Enlace	Máximas pérdidas [dB]	Radio de cobertura de cada sector (km)	Área de cobertura de un sector ( $km^2$ )	Área de cobertura de una BTS $A_{BTS} = 3 \times A_{sector} (km^2)$
Downlink	128,87	1,02	2,7	8,1
Uplink	120,58	0,6	0,94	2,81

Se debe tener muy en cuenta que la portadora localizada en la banda de 1900 MHz tendrá una cobertura menor. Utilizando el modelo COST231-HATA se determina que el radio de cobertura de una célula en esta portadora será igual a 0,56 km para el *downlink* y 0,34 km para el *uplink* lo que da una cobertura de 0,81  $km^2$  y 0,3  $km^2$  respectivamente.

## 4.5 ANÁLISIS DE TRÁFICO Y PROYECCIONES A FUTURO

El análisis se lo realizará para la situación actual del operador, es decir considerando que únicamente emplea una portadora para la tecnología de tercera generación y adicionalmente ésta coexiste con la tecnología GSM.

En primer lugar se determinará el número total de usuarios que se puede soportar en la zona de estudio realizando un análisis de tráfico en Erlangs, pues pueden considerarse bloqueos inclusive para aplicaciones con altas tasas de transmisión en tiempo real como video llamadas.

**Tabla 4.22.** Parámetros utilizados para el análisis de tráfico en la red de análisis

Parámetro	Downlink	Uplink
Factor de carga $n$ (%)	90 %	50 %
Probabilidad de bloqueo	1 %	1 %
Tráfico un usuario [Erlang]	0,015	0.015
Tasa de transmisión (kbps)	384	384
$i$ (Relación de interferencia)	0,65	0,65

La cantidad de tráfico en Erlangs soportado por el sistema y el número de usuarios se muestra en la tabla a continuación.

**Tabla 4.23.** Tráfico en Erlangs y número de usuarios para un sector

Enlace	Canales por sector ( $N$ )	Tráfico [Erl]	Número de usuarios
Downlink	2	0,15	10
Uplink	2	0,15	10

Considerando que existen 24 sectores en las 9 estaciones base empleadas para la zona de estudio, el número de usuarios con un tráfico de 15 mili Erlangs a los que puede dar servicio es de 240 tanto para el *uplink* como para el *downlink* dentro de la zona analizada.

Ahora se debe determinar si la capacidad de dar servicio a los 240 usuarios con un tráfico de 15 mili Erlangs es suficiente para la zona de estudio. Para realizar este análisis se considera el número total de abonados que tiene el operador con la tecnología UMTS a nivel nacional. Se distribuirá el número total de usuarios por zonas en función del número de estaciones base por provincia y el área de cobertura en cada una de ellas.

El número total de usuarios empleando transmisión de datos con tasas de hasta 384 kbps es 52492 [50] a nivel nacional. El número de estaciones base UMTS y la distribución aproximada del número de usuarios por provincia en función del número de estaciones base se muestra en la tabla 4.24.

**Tabla 4.24.** Número de estaciones base por provincia [50]

Provincia	Radio bases operador de prueba	Usuarios UMTS por provincia
Azuay	29	3274
Bolívar	0	0
Cañar	0	0
Carchi	0	0
Chimborazo	9	1016
Cotopaxi	8	903
El Oro	12	1355
Esmeraldas	13	1468
Galápagos	0	0
Guayas	138	15578
Imbabura	15	1693
Loja	13	1468
Los Ríos	11	1242
Manabí	42	4741
Morona Santiago	0	0
Napo	0	0
Orellana	0	0
Pastaza	0	0
Pichincha	120	13546
Santa Elena	19	2145
Sto. Domingo de los Tsáchilas	20	2258
Sucumbios	0	0
Tungurahua	16	1806
Zamora Chinchipe	0	0

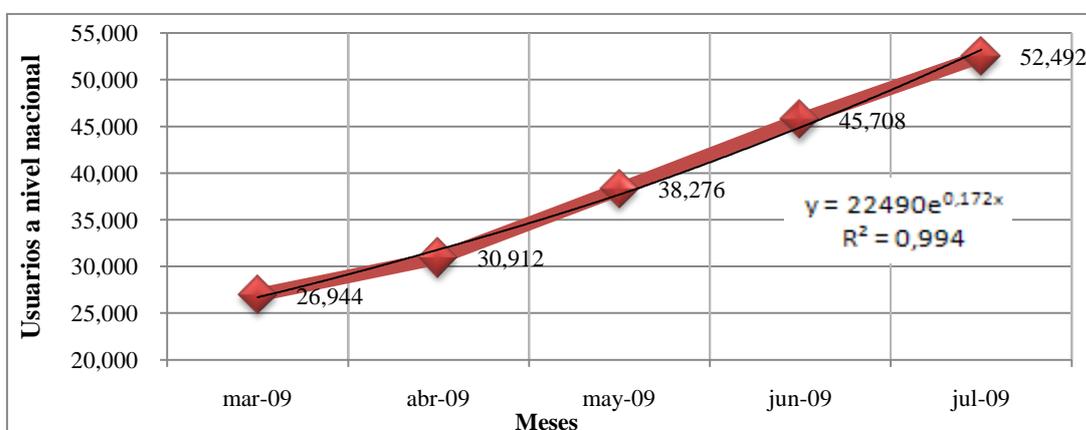
Dentro de la provincia de Pichincha el operador únicamente tiene cobertura en el Distrito Metropolitano de Quito y en las parroquias urbanas del cantón Rumiñahui [37], por tanto los 13546 usuarios en esta zona se distribuirán entre estos dos cantones en función de la superficie de cada uno de ellos, tal como se indica en la tabla 4.25.

**Tabla 4.25.** Distribución de usuarios UMTS en la provincia de Pichincha

Cantón	Superficie ( $km^2$ )	Número de usuarios UMTS
Quito	4204 [51]	13365
Rumiñahui (zona urbana)	57.04 [52]	181

Considerando que los usuarios se encuentran uniformemente distribuidos sobre el Distrito Metropolitano de Quito y debido a que el área de estudio es de aproximadamente  $10 km^2$ , se determina que en esta zona existen alrededor de 32 usuarios con terminales de datos UMTS, los cuales podrían ser atendidos simultáneamente sin ningún problemas. Además considerando que cada usuario genera un tráfico no mayor a los 15 mili Erlangs se puede atender hasta unas ocho veces este número de abonados lo cual puede suscitarse debido que la zona de análisis es una zona en la que se encuentran varios centros comerciales y además el parque más grande de la ciudad.

Para realizar un análisis a futuro se tendrá en cuenta estadísticas de la Secretaria Nacional de Telecomunicaciones (SENATEL) sobre el incremento en el número de usuarios durante los últimos meses, tal como se muestra en la figura 4.18.



**Figura 4.18.** Incremento de usuarios UMTS en el Ecuador [50]

Si el incremento de usuarios mantiene la misma tendencia, y no se instalan más estaciones base, para el mes de julio del año 2010, la capacidad de la zona en estudio ya no sería suficiente pues se tendría alrededor de 250 usuarios con tecnología UMTS en este sitio, por lo cual el operador debería incrementar la capacidad del sistema disminuyendo el tamaño de la células o instalar más estaciones base pero teniendo en cuenta los niveles de interferencia, puede considerar además aplicar técnicas de diversidad pues al tratarse de una zona en la cual la mayor parte de usuarios son peatones se podría incrementar hasta en un 90% la capacidad del sistema, es decir se podrían emplear 4 canales simultáneos para ambos enlaces. Si se realiza el análisis de tráfico se obtiene que el sistema puede soportar 57 usuarios por sector (usuarios con tráfico de 15 mili Erlangs), es decir se puede brindar servicio a 1368 usuarios en la zona de estudio con lo que se puede dar servicio con altas tasas de transmisión a los usuarios hasta el mes de abril del año 2011, considerando que no se han incrementarán el número de estaciones base a nivel nacional y una distribución uniforme de los usuarios sobre la zona con cobertura.

Otra alternativa para incrementar la capacidad del sistema es utilizar otras bandas de frecuencias a fin de emplear varias portadoras para el sistema de tercera generación. Si se utilizan dos frecuencias portadoras, los resultados son similares al empleo de técnicas de diversidad. Sin embargo y considerando las bandas de las que dispone el operador de prueba se podrían utilizar hasta tres frecuencias portadoras en un futuro, cuando existan pocos usuarios con terminales de segunda generación. Si se emplean estas tres portadoras se podrá dar servicio a 3040 usuarios en la zona de estudio para el *downlink* con lo que se puede atender a todos los usuarios en el Ecuador sin dificultad hasta el último trimestre del año 2011. Para el caso del *uplink* si se utilizan tres frecuencias portadoras se puede dar servicio a 4960 usuarios con un tráfico de 15 mili Erlangs y por tanto la capacidad en la zona de estudio será suficiente hasta diciembre del año 2011. De igual manera se considera para el *downlink* y el *uplink* que no se incrementarán el número de estaciones base y por ende la cobertura a nivel nacional.

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS DE EFICIENCIA ESPECTRAL PARA LA TECNOLOGÍA HSPA

#### 5.1 INTRODUCCIÓN

UMTS se ha evolucionado fuertemente gracias al desarrollo de las tecnologías HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) y HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*), juntas llamadas HSPA (*High Speed Packet Access*) [53] y conocidas como la generación 3.5. Cuando la UIT definió que uno de los objetivos para los sistemas IMT-2000 en la década de los 90s, la tasa de transmisión requerida era de 2 Mbps. Como se analizó en el capítulo 3, en la práctica y debido a efectos de interferencias y multitrayectoria la tecnología UMTS inclusive no alcanza un *throughput* igual a los 2 Mbps, mientras que con HSPA se puede superar fácilmente dichas tasas de transmisión y llegar a los 14,4 Mbps con el *Release 7* para HSDPA. Para los operadores realizar la actualización desde UMTS a HSPA es relativamente sencillo y eficiente pues se reutilizan todos los elementos de la red.

Considerando la gran acogida de los servicios de transmisión de datos en el Ecuador, las operadoras de telefonía móvil han implementado la tecnología HSDPA en sus redes UMTS con lo que se ha podido incrementar considerablemente las velocidades de transmisión, ofreciendo de este modo más y mejores servicios. Es por este motivo que resulta de útil para el presente estudio considerar un caso real en el que se pueda determinar la capacidad del sistema HSPA en función de los parámetros empleados por el operador de prueba, así como también los equipos terminales presentes en el mercado.

## 5.2 ANÁLISIS PARA EL DOWNLINK - HSDPA

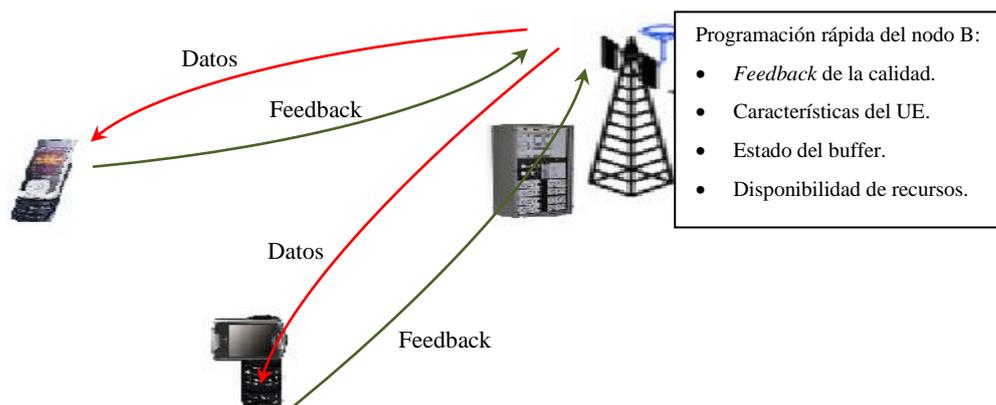
### 5.2.1 Aspectos básicos de HSDPA

Las operaciones fundamentales implementadas en HSDPA son la adaptación del enlace, rápida programación y retransmisión en el nivel físico. Éstas técnicas tienen el fin de mejorar el *downlink* de paquetes de datos lo que se refleja en un incremento de la capacidad de la célula. HSDPA no soporta las características que el canal DCH de UMTS maneja como control de potencia o *soft handover*.

En la tecnología HSDPA se han introducido nuevos canales para la transmisión de datos de los usuarios, estos son el canal HS-DSCH (*High Speed Downlink Shared Channel*) y el correspondiente canal físico, en los cuales se enfocará el análisis. Para la señalización asociada necesaria se emplean dos canales: HS-SCCH (*High Speed Control Channel*) en el *downlink* y HS-DPCCH (*High Speed Dedicated Control Channel*) en la dirección ascendente.

El canal HS-DSCH realiza un uso muy eficiente de los recursos de radiofrecuencia y además maneja el tráfico de datos a manera de ráfagas. Este nuevo canal de transporte comparte los múltiples códigos de acceso que utiliza además de la potencia de transmisión y la infraestructura de *hardware* entre diversos usuarios. Los recursos de la red de radio pueden ser empleados eficientemente entre un largo número de usuarios que no están transmitiendo de forma continua. Por tanto, varios usuarios pueden ser multiplexados en el tiempo de modo que durante los períodos en los que no transmiten uno o varios usuarios entonces los recursos están disponibles para otros.

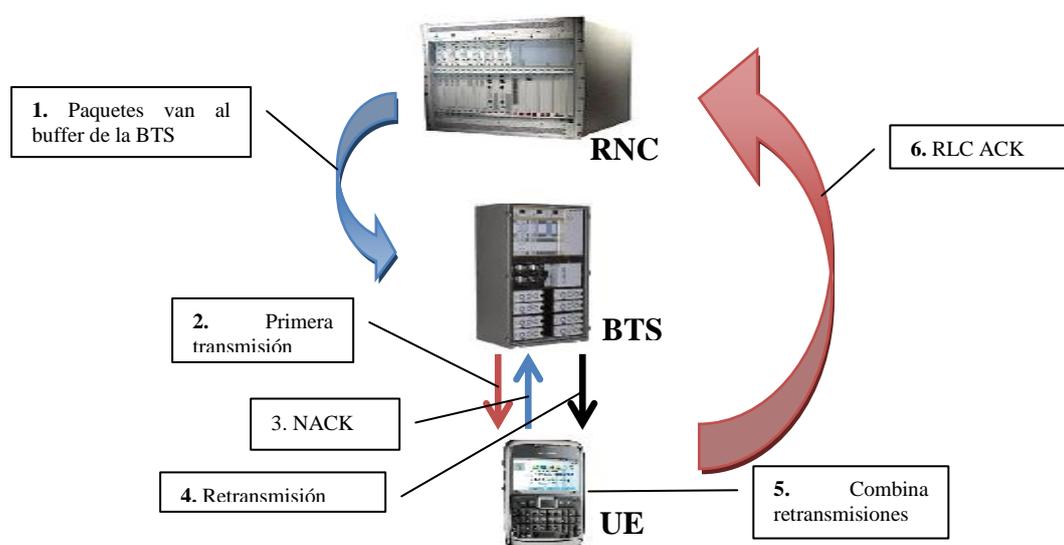
El principio de operación básico de HSDPA se muestra en la figura 5.1, en la cual el Nodo B estima la calidad del canal de cada usuario activo en base a una retroalimentación mediante el canal HS-DPCCH y en función de esta información el Nodo B selecciona el esquema de modulación apropiado, considerando que para HSDPA a más de la modulación QPSK se ha implementado el esquema 16-QAM lo que incrementa las tasas de transmisión. HSDPA únicamente emplea únicamente turbo codificación.



**Figura 5.1.** Principio de programación del nodo B [53]

Otra tecnología implementada para HSDPA es la retransmisión en la capa física (Figura 5.2). En UMTS si un paquete de datos no se recibía correctamente existía la necesidad de la retransmisión desde el RNC. Con HSDPA los paquetes son primero recibidos en el *buffer* del Nodo B, los paquetes son entonces almacenados y estos son retransmitidos si hubiere algún un error en la decodificación, por tanto la retransmisión se realiza desde el Nodo B y no se involucra al RNC.

El empleo de operaciones multi código en el canal HS-DSCH es otro mecanismo importante para incrementar la capacidad del sistema. Este canal tiene como característica especial el emplear un factor de esparcimiento fijo igual a 16. El número máximo de códigos disponibles para un factor de esparcimiento de 16, es 16, pero debido a la presencia de canales comunes utilizados en el *downlink* se puede emplear hasta 15 códigos.



**Figura 5.2.** Técnica de retransmisión en la capa física [53]

### 5.2.2 Factores de desempeño para HSDPA

Las principales características de la adaptación del enlace utilizado en HSDPA son la modulación y codificación adaptativa (AMC), transmisión multi código (múltiples HS-DSCHs) y las técnicas de retransmisión como HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*). Por tanto la evaluación del desempeño para HSDPA es ligeramente distinta a la utilizada en UMTS debido a que se emplean tasas de transmisión variadas en el HS-DSCH en cada intervalo de transmisión (TTI), se utilizan diferentes esquemas de modulación, tasas de código efectivas (cantidad de repetición o *puncturing*) y un número variable de códigos empleados. Por tales motivos para evaluar el desempeño de HSDPA se define la relación promedio entre la señal a la interferencia más ruido ( $\gamma_b$ ) mediante la siguiente expresión [53]:

$$\gamma_b = SF_{16} \frac{P_{HS-DSCH}}{(1-\alpha)P_{own} + P_{other} + P_{noise}} \quad (5.1)$$

Donde:

$SF_{16}$  → Es el factor de esparcimiento de HS-PDSCH que es igual a 16.

$P_{HS-DSCH}$  → Potencia recibida de la suma de los códigos activos de HS-PDSCH.

$P_{own}$  → Interferencia recibida de la propia célula, mencionado en documentos de la 3GPP como  $I_{or}$ .

$P_{other}$  → Potencia recibida de otras células, mencionado en documentos de la 3GPP como  $I_{oc}$

$\alpha$  → Factor de ortogonalidad

$P_{noise}$  → Ruido térmico en el dispositivo receptor.

Se debe tener muy en cuenta que el  $\gamma_b$  para el canal HS-DSCH es independiente del número de códigos utilizados, el esquema de modulación y la tasa de código efectiva, además este parámetro es un factor fundamental para el dimensionamiento de la capacidad de la red.

Otro parámetro comúnmente utilizado es el factor de geometría,  $G$ , el cual se define como [53]:

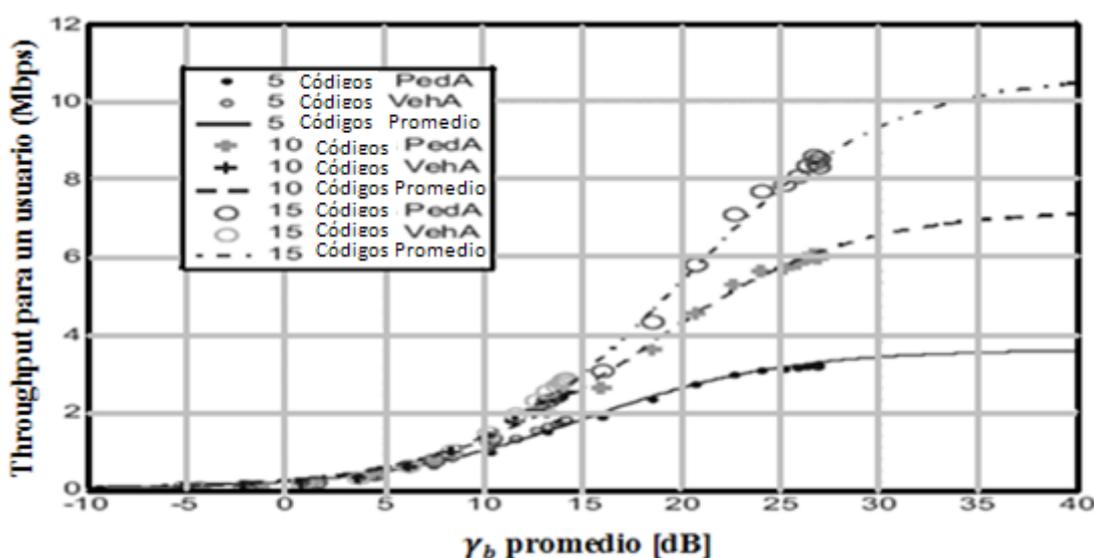
$$G = \frac{P_{own}}{P_{other} + P_{noise}} \quad (5.2)$$

El factor de geometría se mencionó en la sección 2.6.2 y se conoce también como  $I_{or}/I_{oc}$  en publicaciones y especificaciones técnicas de la 3GPP.

### 5.2.3 Throughput en HSDPA

El canal HS-DSCH es el canal de transporte que lleva los datos del usuario en HSDPA, por tanto el análisis del desempeño del mismo permite determinar el *throughput* que se puede lograr en una célula que trabaja con HSDPA.

La figura 5.3 muestra el *throughput* promedio para un usuario incluyendo los mecanismos de adaptación del enlace y HARQ en función del  $\gamma_b$ . Los resultados se muestran para 5, 10 y 15 códigos.



**Figura 5.3.** *Throughput* promedio en el *downlink* en función del  $\gamma_b$  promedio y el número de códigos HS-DSCH empleados [53].

Según la ecuación 5.1, el  $\gamma_b$  no es constante debido a que depende de parámetros como la ortogonalidad o el ruido térmico generado en el dispositivo receptor, sin embargo el beneficio de trabajar con este parámetro es que al realizar una gráfica de relación con el *throughput* ésta será constante para diferentes ambientes y diferentes características del dispositivo receptor [53].

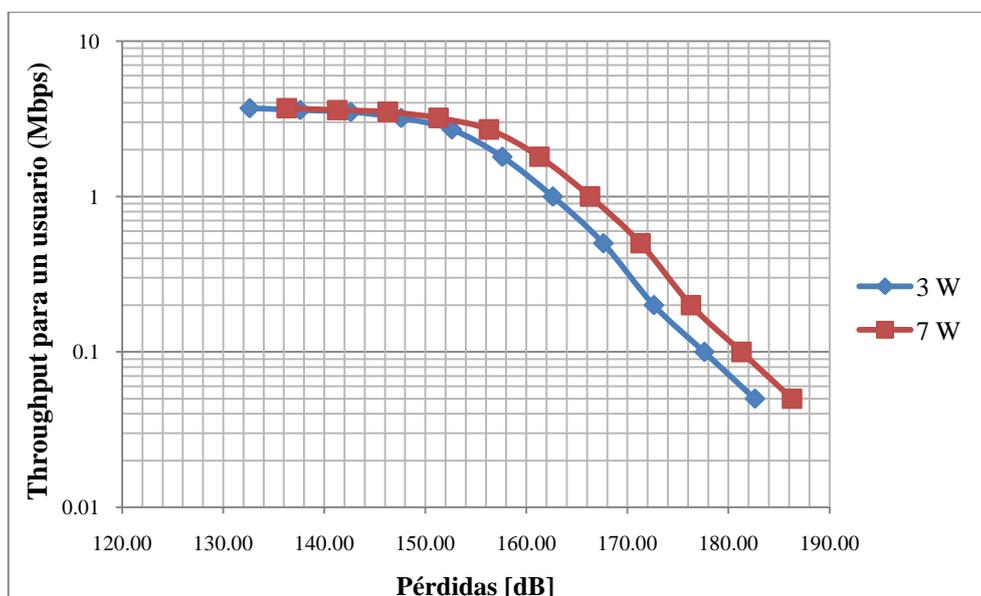
Utilizando la figura 5.3, la ecuación 5.1 y el modelo de propagación para un peatón clase A establecido por la ITU cuyas pérdidas están dadas por la ecuación 5.3 [54] se puede determinar la relación que existe entre las pérdidas en una célula, la potencia que se utiliza para el canal HS-DSCH y el *throughput*.

$$L = 30 \log f_c(\text{MHz}) + 49 + 40 \log d(\text{km}) \quad (5.3)$$

Para los cálculos respectivos se considera que la célula no recibe interferencia externa, el resto de parámetros empleados para los cálculos se muestran en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1.** Parámetros considerados para el cálculo de las pérdidas en el *downlink*

Parámetro	Valor
Pérdidas en el cable (Nodo B)	4 dB
Ganancia de la antena en el Nodo B	18 dBi
Potencia de ruido térmico en el UE	-101 dBm
Potencia asignada al canal HS-DSCH	3 y 7 W
Frecuencia central	1950 MHz
Distancia entre el Nodo B y el UE	3 km
$\alpha$ (Ortogonalidad)	0,5



**Figura 5.4.** *Throughput* en el *downlink* en función de las pérdidas en el enlace para diferentes potencias asignadas al canal HS-DSCH. No se considera interferencia de otras células (5 códigos)

Se puede apreciar en la figura 5.4 que al incrementar la potencia de transmisión para el canal HS-DSCH se puede tolerar un valor de pérdidas mayor logrando las mismas tasas de transmisión.

A continuación se considerarán los efectos de la interferencia de otras células. Asumiendo que el factor de geometría es conocido, se puede determinar la potencia mínima requerida para el canal HS-DSCH para asegurar un *throughput* dentro de la célula.

La ecuación 5.1 puede ser expresada como:

$$\gamma_b = SF_{16} \frac{P_{HS-DSCH}}{P_{own}} \frac{1}{1-\alpha+G^{-1}} \quad (5.4)$$

Despejando la potencia del canal HS-DSCH se tiene:

$$P_{HS-DSCH} \geq \gamma_b [1 - \alpha + G^{-1}] \frac{P_{own}}{SF_{16}} \quad (5.5)$$

Donde:

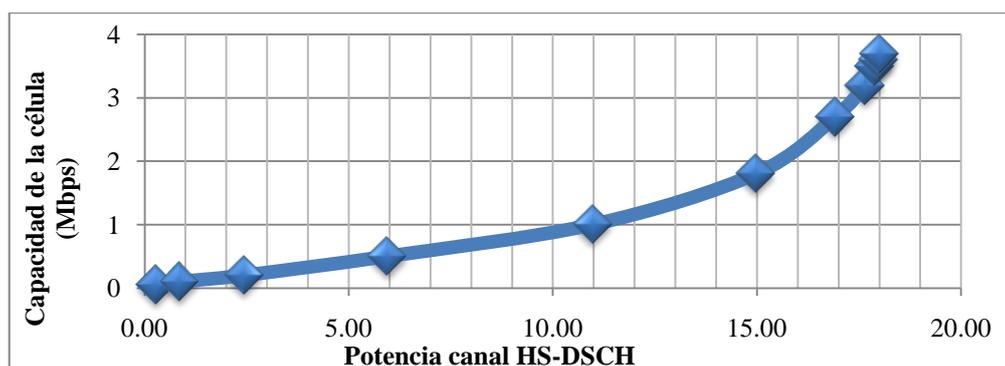
$P_{HS-DSCH}$  → Potencia de transmisión del Nodo B para el canal HS-DSCH.

$P_{own}$  → Potencia total de transmisión del Nodo B menos  $P_{HS-DSCH}$

Empleando la ecuación 5.5 y la figura 5.3 se puede determinar como incrementa la capacidad de la célula en función de la potencia que se asigna para el canal HS-DSCH y el número de códigos empleados, para ello se emplearán los siguientes parámetros:

**Tabla 5.2.** Parámetros para el cálculo de la capacidad de la célula en función de la potencia empleada

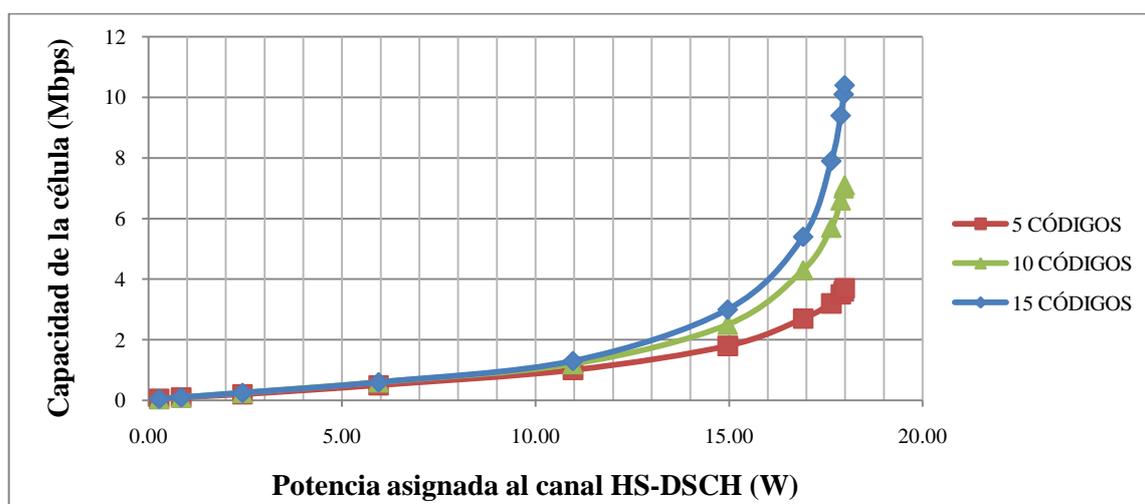
Parámetro	Valor
Potencia de transmisión para el canal CPICH	2 W
Potencia de transmisión del nodo B	20 W
G (Factor de Geometría)	-3 dB
$\alpha$ (Ortogonalidad)	0.5



**Figura 5.5.** *Throughput* para un usuario con tecnología HSDPA en función de la potencia asignada al canal HS-DSCH empleando 5 códigos HS-PDSCH

La figura 5.5 muestra la relación que existe entre el *throughput* de una célula y la potencia que se emplea en el Nodo B para el canal HS-DSCH cuando se utilizan 5 códigos HS-DSCH. Una característica importante de HSDPA es que toda la potencia de la célula puede ser direccionada a un solo usuario por un corto periodo de tiempo, por tal motivo se puede lograr altas tasas de transmisión para un terminal móvil en particular, pero, simultáneamente se deja sin servicio al resto de usuarios.

La potencia máxima que se puede utilizar para el canal HS-DSCH en función de los valores de la tabla 5.2 es igual a  $P_{HS-DSCH} = 20W - 2W = 18W$ , esto sin considerar los canales físicos comunes adicionales o la utilización del canal DCH en caso de coexistencia con UMTS.



**Figura 5.6.** Capacidad de una célula en el *downlink* para un usuario en función de la potencia asignada al canal HS-DSCH y el número de códigos HS-DSCH utilizados

**Tabla 5.3.** Capacidad de una célula utilizando 18 W para el canal HS-DSCH

Códigos HS-DSCH	Throughput (Mbps)
5 códigos	3,8
10 códigos	7,25
15 códigos	10,8

HSDPA al utilizar la misma infraestructura que UMTS puede emplear las técnicas analizadas en la sección 3.6 para incrementar la capacidad del sistema. Considerando que se emplee sectorización (3 sectores) y que cada sector posea su propio amplificador de potencia, adicionalmente se utilicen técnicas de diversidad, la capacidad de la célula en HSDPA podría incrementarse a:

**Tabla 5.4.** *Throughput* de una célula empleando técnicas para incrementar su capacidad

Códigos HS-DSCH	Throughput por sector (Mbps)
5 códigos	$3,8 \times 3 \times 1,2 = 13,68$
10 códigos	$7,25 \times 3 \times 1,2 = 26,10$
15 códigos	$10,8 \times 3 \times 1,2 = 38,88$

## 5.2.4 Eficiencia Espectral de HSDPA

Para el caso de HSDPA no se puede determinar un número exacto de usuarios en función de la tasa de transmisión que ellos emplean, esto debido a que los diferentes terminales móviles soportan distinta cantidad de códigos HS-DSCH, o el nodo B escogerá un distinto esquema de modulación para cada uno de ellos en función de las características del canal e inclusive en función de las características del terminal móvil. Por tales motivos para el caso de HSDPA se considerará un único usuario para determinar la eficiencia espectral a diferencia de lo que se hizo en el capítulo 3 en el que se empleó las ecuaciones de carga para expresar la eficiencia espectral del sistema en función del número de canales simultáneos que soporta una célula.

Se expresará la eficiencia espectral de HSDPA en función de la capacidad máxima obtenida en la figura 5.6 en términos de *bps/usuario/Hz/célula* en función de la cantidad de códigos HS-PDSCH utilizados, la tabla 5.5 muestra los resultados obtenidos:

**Tabla 5.5.** Eficiencia espectral de HSDPA

<b>Códigos HS-DSCH</b>	<b>Eficiencia Espectral <i>bps/usuario/Hz/célula</i></b>
<b>5 códigos</b>	$3,8 \text{ Mbps}/1 \text{ usuario} / 5 \text{ MHz}/1 \text{ célula} = 0,76$
<b>10 códigos</b>	$7,25 \text{ Mbps}/1 \text{ usuario} / 5 \text{ MHz}/1 \text{ célula} = 1,45$
<b>15 códigos</b>	$10,8 \text{ Mbps}/1 \text{ usuario} / 5 \text{ MHz}/1 \text{ célula} = 2,16$

Si se emplea sectorización y otras técnicas para incrementar la capacidad de la célula, la eficiencia espectral incrementará como se muestra a continuación:

**Tabla 5.6.** Eficiencia espectral de HSDPA empleando sectorización

<b>Códigos HS-DSCH</b>	<b>Eficiencia Espectral <i>bps/usuario/Hz/sector/célula</i></b>
<b>5 códigos</b>	$13,68 \text{ Mbps}/1 \text{ usuario} / 5 \text{ MHz}/3 \text{ sector}/1 \text{ célula} = 0,912$
<b>10 códigos</b>	$26,10 \text{ Mbps}/1 \text{ usuario} / 5 \text{ MHz}/3 \text{ sector}/1 \text{ célula} = 1,740$
<b>15 códigos</b>	$38,88 \text{ Mbps}/1 \text{ usuario} / 5 \text{ MHz}/3 \text{ sector}/1 \text{ célula} = 2,592$

### 5.3 ANÁLISIS PARA EL UPLINK - HSUPA

#### 5.3.1 Aspectos básicos de HSUPA

La principal característica de HSUPA definida en las especificaciones técnicas 3GPP es la existencia de un nuevo canal de transporte empleado para el *uplink*, este canal se denomina Canal Dedicado Mejorado (E-DCH) el cual tienen algunas de las mismas características que el canal HS-DSCH de HSDPA. El canal de transporte E-DCH soporta una programación rápida del Nodo B, además de la técnica HARQ e intervalos de transmisión (TTI) de 2 y 10 ms. A diferencia del canal HS-DSCH, E-DCH no es un canal compartido lo que implica que cada terminal móvil tiene su propio canal E-DCH, el mismo que emplea un factor de esparcimiento variable y además se emplea para el control de potencia para los equipos terminales. Los datos del usuario son transportados utilizando el canal E-DPDCH (Canal de Datos Físico Dedicado Mejorado) el cual soporta un factor de esparcimiento de 2 a 256, con todas estas características la tecnología HSUPA puede alcanzar una capacidad máxima teórica de 5,76 Mbps.

A diferencia de HSDPA, HSUPA no soporta modulación adaptativa debido a que no se puede emplear esquemas de modulación complejos pues requieren de una mayor energía por bit para poder ser transmitidos, al contrario que cuando se utiliza múltiples códigos paralelos empleando modulación BPSK.

### 5.3.2 Factores de desempeño para HSUPA

Los principales factores a considerar para evaluar el desempeño de HSUPA son el número de bits que se envían en un bloque de datos (TBS – *Transport Block Size*), la tasa de transmisión promedio de los usuarios en la célula, el BLER y el número de retransmisiones HARQ gracias a las cuales se logra disminuir los retardos lo cual permite reducir el  $\gamma_b$  y de este modo se puede incrementar la eficiencia espectral.

La relación entre las tasas de transmisión para un usuario y el  $\gamma_b$  requerido se muestra en la gráfica a continuación.

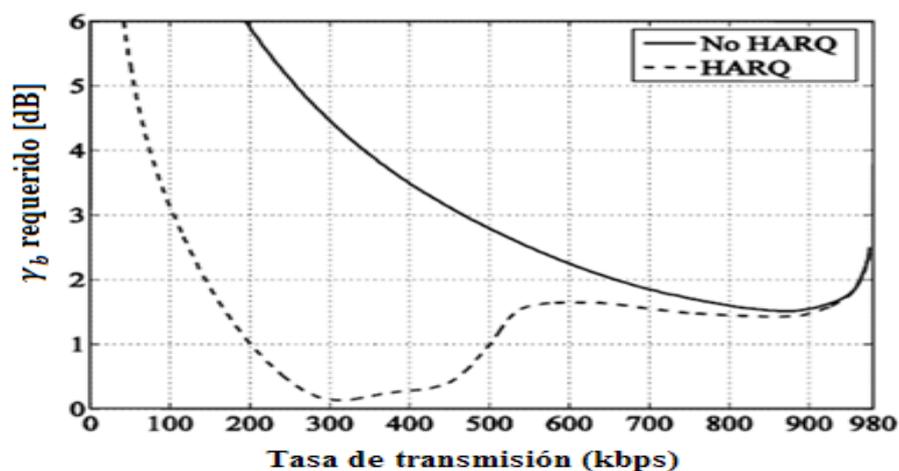


Figura 5.7.  $\gamma_b$  requerido en función de la tasa de transmisión de un usuario HSUPA [53]

### 5.3.3 Throughput en HSUPA

Debido a que el canal E-DPDCH de HSUPA emplea factores de esparcimiento variables se puede emplear las ecuaciones de carga para el *uplink* analizadas en la sección 3.2.1 con lo cual podemos determinar el número de usuarios que puede soportar el sistema y mediante la ecuación 3.17 se puede calcular el *throughput* que soporta la célula.

Si se considera usuarios con transmisión de datos en tiempo real con una tasa de transmisión de 128 kbps y además el resto de parámetros mostrados en la tabla 5.7 se puede determinar la capacidad máxima de la célula con la tecnología HSUPA.

**Tabla 5.7.** Parámetros considerados para el cálculo de la capacidad de una célula con tecnología HSUPA

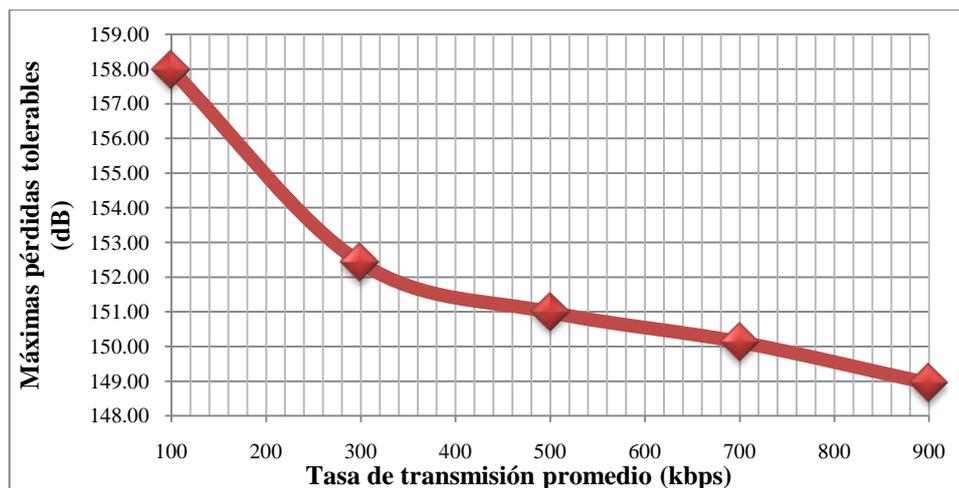
Parámetro	Valor
$v_j$	1
$W$ [Mcps]	3,84
$\bar{i}$	0,65
$R$ (kbps)	128
$n_{UL}$ (%)	100

En la figura 5.7 se puede apreciar que para una tasa de transmisión de 128 kbps se requiere un  $\gamma_b$  de 2,1 dB. Con este valor se obtiene que el sistema soporta 12 usuarios simultáneos y un *throughput* total igual a 1544,23 kbps.

Se puede determinar la capacidad de la célula en función de las pérdidas máximas que ésta puede soportar. El análisis es similar al realizado en la sección 3.5.2 para pérdidas en la trayectoria para el caso del *uplink*. Los parámetros considerados y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.8.

**Tabla 5.8.** Máximas pérdidas que tolera una célula en función de la tasa de transmisión promedio

Tasa de transmisión promedio (kbps)	100	300	500	700	900
Potencia del terminal móvil (dBm)	21	21	21	21	21
$N_{rf}$ [dBm]	-169,00	-169,00	-169,00	-169,00	-169,00
Tasa de transmisión [dB]	39,11	49,14	54,79	57,28	59,18
Factor de carga (%)	75	75	75	75	75
Margen de interferencia $\rho_{UL}$ [dB]	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02
$\gamma_b$ [dB]	3	0,2	1	1,6	1,5
Sensibilidad en el Nodo B	-131,15	-117,58	-111,40	-109,14	-107,68
Ganancia antena Nodo B [dBi]	18	18	18	18	18
Ganancia antena UE [dBi]	0	2	2	2	2
Pérdidas en cables y conectores [dB]	3	3	3	3	3
Máximas pérdidas [dB]	157,98	152,41	150,99	150,13	148,94



**Figura 5.8** Máximas pérdidas en función de la tasa de transmisión promedio para HSUPA

Se puede apreciar en la figura 5.8 que en una célula con tecnología HSUPA y además se encuentra limitada por las pérdidas en el trayecto se puede alcanzar mayores tasas de transmisión para cada usuario que las que se alcanza con la tecnología UMTS.

### 5.3.4 Eficiencia espectral para HSUPA

Para determinar la eficiencia espectral de HSUPA se considerará el caso en que la célula se encuentra en su capacidad total, es decir cuando el factor de carga es igual a 1. Utilizando los resultados de la sección 5.3.3 podemos determinar la eficiencia espectral en términos de *bps/Hz/célula*.

$$Eficiencia\ espectral_{HSUPA} = 1544,23\ kbps/5\ MHz/1\ célula$$

$$Eficiencia\ espectral_{HSUPA} = 0,31\ bps/Hz/célula$$

En HSUPA al igual que HSDPA se puede utilizar técnicas como sectorización o diversidad espacial con el objetivo de incrementar la capacidad de la célula y por tanto la eficiencia espectral del sistema.

## 5.4 CASO DE ESTUDIO

### 5.4.1 Consideraciones para el caso de estudio

Para este caso de estudio los parámetros son los mismos considerados en el capítulo 4 en el que se realizó el estudio para la tecnología UMTS, es decir, la distribución del espectro para la tecnología HSPA y GSM será igual a cuando se estudio la tecnología UMTS, al igual que la zona de estudio y las estaciones base para el operador de prueba. Se tendrá en cuenta los datos técnicos de las estaciones Huawei DBS3800 pues éstas soportan la tecnología HSPA con un máximo de 15 códigos HS-DSCH [39] en cada célula para el *downlink*.

En cuanto a los equipos terminales se considerarán para el análisis los módems de la tabla 4.2 pues son los equipos más comercializados en lo referente a aplicaciones que emplean transmisión de datos en el Ecuador.

### 5.4.2 Análisis para el *downlink*

#### *Capacidad de la célula*

La estación base utilizada soporta la tecnología HSDPA teóricamente alcanza tasas de transmisión de hasta 14,4 Mbps en un ambiente ideal sin multitrayectorias, adicionalmente ésta velocidad de transmisión no es real debido a que se utiliza codificación de canal (turbo códigos). Si se considera una tasa de código de  $r = 3/4$ , entonces la máxima capacidad teórica de la célula será igual a  $14,4 \text{ Mbps} \times 3/4 = 10,8 \text{ Mbps}$ , que son los valores máximos alcanzados según la gráfica 5.3. Se debe tener en cuenta que esta capacidad para la célula es por cada intervalo de transmisión.

La capacidad teórica máxima de la célula no siempre se logra, por tanto para determinar la capacidad real de la célula se debe considerar la interferencia proveniente de células adyacentes la cual es considerada en el factor de geometría ( $G$ ), otros parámetros a tener en cuenta son la ortogonalidad, la potencia total de transmisión, la potencia asignada

al canal HS-DSCH y la potencia empleada para los canales comunes. Los valores utilizados se muestran en la tabla 5.9.

**Tabla 5.9.** Consideraciones para el cálculo de  $\gamma_b$  en el sistema HSDPA

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión del nodo B	20 W
Potencia de transmisión para el canal CPICH (Canal piloto común) y otros canales comunes (Ver Tabla 3.17)	3,6 W
$G$ (Factor de Geometría)	10 dB [55]
$\alpha$ (Ortogonalidad)	0,5

Para determinar la capacidad máxima de la célula se considerará el esquema de modulación 16QAM. La especificación técnica 3GPP TS 25.101 (*Release 7*) indica como requerimiento mínimo un factor de geometría de 10 dB para este tipo de modulación, además el grupo de trabajo TSG RAN WG4 de la 3GPP en base a evaluaciones de redes HSDPA reales, indica que en la gran mayoría de ellas el factor de geometría es mayor o mínimo igual a 10 dB.

Para determinar la capacidad de la célula se debe en primer lugar hallar el valor de  $\gamma_b$ . Empleando la ecuación 5.4 y los valores especificados en la tabla 5.9, se determina que  $\gamma_b$  es igual a 22 dB. En la figura 5.3 podemos establecer que para el valor de  $\gamma_b$  calculado, el *throughput* real de la célula es de 7,2 Mbps y si se utiliza turbo codificación con  $r = 3/4$  entonces la capacidad de la célula será de 9,6Mbps.

### ***Número de usuarios por célula***

Para poder determinar el número de usuarios simultáneos se debe analizar previamente la tasa de transmisión por cada código HS-DSCH en función del esquema de modulación empleado y la tasa de chip. Consideremos intervalos de transmisión (TTI) de 2 ms, como la tasa de chip empleada es 3,84 Mcps entonces existirán 7680 chips por cada TTI. Ahora se debe recordar que el canal HS-DSCH tiene un factor de esparcimiento constante el mismo que es igual a 16, por lo tanto existen 480 símbolos (chips modulados) en cada código. El número de bits por cada TTI y la tasa de transmisión dependerán del esquema de modulación utilizado según se indica en la tabla 5.10.

**Tabla 5.10.** Número de bits y tasa de transmisión por TTI según el esquema de modulación

Esquema de modulación	Numero de bits por símbolo	Número de bits por código en un $TTI = 2ms$	Tasa de transmisión por código con codificación de canal en un TTI (kbps)
QPSK	2	960	480
16QAM	4	1920	960

Por lo tanto si se emplean los 15 canales utilizando modulación 16QAM se puede alcanzar un *throughput* igual a 14,4 Mbps que es el límite teórico para HSDPA.

Es importante tener en cuenta la capacidad y características de los terminales móviles HSDPA según las diferentes categorías establecidas. Dichas categorías se detallan en la tabla a continuación.

**Tabla 5.11.** Categorías para equipos terminales HSDPA [53]

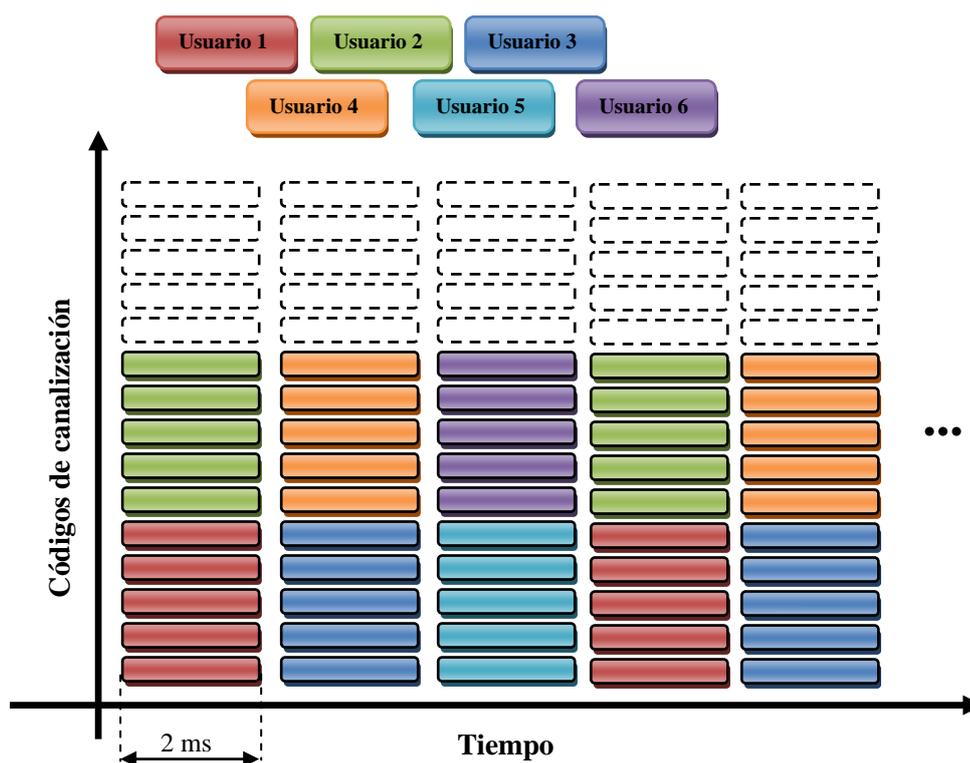
Categoría	Máximo número de códigos HS-DSCH paralelos	Mínimo intervalo inter - TTI	Bits por TTI Sin codificación	Bits por TTI Con Codificación $r=3/4$	Máxima tasa de transmisión (Mbps)
1 – 2	5	3	7200	9600	1,2
3 – 4	5	2	7200	9600	1,8
5 – 6	5	1	7200	9600	3,6
7 – 8	10	1	14411	19214	7,2
9	15	1	20251	27001	10,2
10	15	1	27952	37269	14,4
11	5	2	3630	4840	0,9
12	5	1	3630	4840	1,8

En la tabla 5.11 se detalla el parámetro mínimo intervalo inter-TTI, el cual indica el número de intervalos de transmisión que debe esperar el dispositivo móvil para transmitir un nuevo bloque de bits. La tasa de transmisión para cada terminal se calcula de la siguiente manera:

$$Tasa_{TX} = \frac{\text{Bits por TTI}}{\text{Mínimo intervalo inter TTI} \times 2 \text{ ms}} \quad (5.6)$$

Para el análisis se considerarán los módems de la tabla 4.2, los cuales son terminales móviles de la categoría 1 pues están programados para que en el Ecuador alcancen una tasa de transmisión máxima igual a 1,2 Mbps.

Anteriormente se determinó que el *throughput* de la célula es de 9,6 Mbps y en la tabla 5.10 se muestra que cada código HS-DSCH con modulación 16QAM alcanza una tasa de transmisión de 960 kbps, por lo tanto se pueden utilizar 10 códigos en cada TTI, se debe tener en cuenta además que los terminales empleados deben esperar 2 intervalos adicionales para transmitir debido a que son de categoría 1, por tanto en dichos intervalos se pueden incluir 4 usuarios adicionales como lo que el total de usuarios sería igual 6 usuarios multiplexados en tiempo con tasas de transmisión de 1,2 Mbps cada uno tal como se muestra en la figura 5.9.



**Figura 5.9.** Códigos HS-DSCH empleados en HSDPA para equipos terminales categoría 1

La tecnología HSDPA se ve de igual manera afectada por la interferencia debido a la coexistencia con la tecnología GSM del mismo operador de prueba como de otros operadores en bandas adyacentes. El análisis es idéntico al realizado en la sección 4.3 y la

disminución en la capacidad se verá reflejada en una ligera disminución en las tasas de transmisión de cada uno de los usuarios tal como se muestra en la tabla 5.12.

**Tabla 5.12.** Pérdidas en la capacidad debido a la coexistencia con redes móviles de tecnología 2G (*Downlink*)

Enlace	Tasa de transmisión (Mbps)	Tasa de transmisión (kbps) Coexistencia con GSM <i>Downlink: -0,4%</i>	Tasa de transmisión (kbps) coexistencia con GSM y otro operador GSM <i>Downlink: -1%</i>
<i>Un usuario</i>	1,2	1,1952	1,1832
<i>Célula</i>	9,6	9,5616	9,4659

Para el caso de estudio y tomando en cuenta que la célula se divide en 3 sectores se puede determinar el *throughput* total en la zona de estudio, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 5.13.** Número de usuarios y capacidad total de la zona de estudio para el *downlink*

			<i>Downlink - HSDPA</i>	
Nro.	Nombre de la Radio Base	Sectores	Usuarios simultáneos	<i>Throughput</i> total (Mbps)
1	AMAZONAS	3	18	28,4
2	INAQUITO	3	18	28,4
3	BENALCAZAR	3	18	28,4
4	CAROLINA	3	18	28,4
5	TSE	2	12	18,9
6	CORDICARGAS	3	18	28,4
7	JARDIN	3	18	28,4
8	INTEROCEAN	3	18	28,4
9	REPUBLICA	1	6	9,47
		<b>Total</b>	<b>144</b>	<b>227,17</b>

Si se emplean tres portadoras, la distribución del espectro mostrada en la figura 4.17 y además se maneja operación coordinada entre las tecnologías 3.5G y 2G, la capacidad de cada sector incrementará como se muestra en la tabla 3.6.

**Tabla 5.14.** Capacidad de un sector considerando tres portadoras (*downlink*)

	<i>Un Sector</i>	
Capacidad de una portadora sin interferencia debido a otras redes (kbps)	9,6	a
Capacidad portadoras en la banda de 850 MHz considerando interferencia de canales GSM adyacentes -0.3% (kbps)	19,14	$b=2(a - a \times 0,003)$
Capacidad de cada sector: Capacidad portadoras en la banda de 850 MHz + Capacidad portadora en la banda de 1900 MHz (kbps)	28,74	a + b
Número de canales simultáneos	18	

La capacidad total para la zona de estudio empleando tecnología HSDPA con tres frecuencias portadoras se detalla en la tabla 5.15.

**Tabla 5.15.** Número de usuarios y capacidad total de la zona de estudio para el *downlink* utilizando tres portadoras

Nro.	Nombre de la Radio Base	Sectores	Usuarios simultáneos	Throughput total (Mbps)
1	AMAZONAS	3	54	86,22
2	INAQUITO	3	54	86,22
3	BENALCAZAR	3	54	86,22
4	CAROLINA	3	54	86,22
5	TSE	2	36	57,48
6	CORDICARGAS	3	54	86,22
7	JARDIN	3	54	86,22
8	INTEROCEAN	3	54	86,22
9	REPUBLICA	1	18	28,74
	<b>Total</b>		<b>432</b>	<b>689,76</b>

### 5.4.3 Análisis para el *uplink*

#### *Capacidad de la célula y número de usuarios simultáneos*

El operador de prueba actualmente no posee implementada la tecnología HSUPA, motivo por el cual no se puede dar un valor de  $\gamma_b$  empleado por el mismo, sin embargo asumiremos este valor en función de la tasa de transmisión máxima de los equipos presentes en el mercado a fin de poder evaluar los resultados en la zona de estudio.

Considerando que la tasa de transmisión máxima en el *uplink* en los equipos mostrados en la tabla 4.2 es 384 kbps, se puede apreciar en la figura 5.7 que el valor de  $\gamma_b$  requerido para esta tasa de transmisión es de 0,4 dB. Los valores mencionados serán utilizados para los cálculos realizados posteriormente. Se tendrá en cuenta que el operador de prueba tiene una carga de 50% para el enlace ascendente [37]. Los parámetros mostrados en la tabla 5.16 serán los que se utilicen para determinar el número de usuarios y el *throughput* de la célula.

**Tabla 5.16.** Parámetros utilizados para el cálculo de la capacidad en el *uplink* con tecnología HSUPA

Parámetro	Valor
$v_j$	1
<b>R (kbps)</b>	384
$\bar{i}$	0,65
$n_{UL}$ (%)	50

Si se emplea la ecuación 3.16 se puede determinar el número de usuarios simultáneos que puede soportar una célula y mediante la ecuación 3.17 determinamos la capacidad de la misma, los resultados se muestran en la tabla 5.17.

**Tabla 5.17.** Capacidad de la célula y número de usuarios simultáneos en el *uplink*

Parámetro	Valor
<b>Usuarios simultáneos</b>	3
<b>Capacidad de la célula</b>	1202,27 kbps

Teniendo en cuenta la coexistencia con tecnologías de segunda generación pertenecientes al operador de prueba y de otros operadores que trabajan en bandas adyacentes, la capacidad de la célula disminuirá según lo indicado en la tabla 5.18.

**Tabla 5.18.** Pérdidas en la capacidad debido a la coexistencia con redes móviles de tecnología 2G (*Uplink*)

Enlace	Capacidad de un sector sin interferencia debido a otras redes (kbps)	Capacidad de un sector coexistente con GSM <i>Uplink</i> : -0,3% (kbps)	Capacidad de un sector coexistente con GSM y otro operador GSM <i>Uplink</i> : -3,3% (kbps)	Número de canales simultáneos
<i>Uplink</i>	1202,27	1198,66	<b>1159,11</b>	3

Recordando que las estaciones base de la zona de estudio emplean sectorización, el número de usuarios y la capacidad total de la zona de estudio se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 5.19.** Número de usuarios y capacidad total de la zona de estudio para el *uplink*

Nro.	Nombre de la Radio Base	Sectores	Usuarios simultáneos	Throughput total (Mbps)
1	AMAZONAS	3	9	3,48
2	INAQUITO	3	9	3,48
3	BENALCAZAR	3	9	3,48
4	CAROLINA	3	9	3,48
5	TSE	2	6	2,32
6	CORDICARGAS	3	9	3,48
7	JARDIN	3	9	3,48
8	INTEROCEAN	3	9	3,48
9	REPUBLICA	1	3	1,16
		<b>Total</b>	<b>72</b>	<b>27,84</b>

Si se eleva la carga de la célula al 75% cuando se requiera una mayor capacidad en el *uplink* se pueden soportar 5 usuarios simultáneos lo que implica un *throughput* igual a 1900,8 kbps por sector. De manera similar que para el *downlink* el operador puede utilizar tres portadoras para la tecnología HSUPA, considerando la distribución del espectro mostrada en la figura 4.17 y además incrementado la carga al 75%, la capacidad de cada sector aumentará de acuerdo al análisis mostrado en la tabla 5.20.

**Tabla 5.20.** Capacidad de un sector considerando tres portadoras (*uplink*)

	<i>Un Sector</i>	
Capacidad de una portadora sin interferencia debido a otras redes (kbps)	1900,80	a
Capacidad portadoras en la banda de 850 MHz considerando interferencia de canales GSM adyacentes -0,3% (kbps)	3790,19	$b=2(a-a \times 0,003)$
Capacidad de cada sector: Capacidad portadoras en la banda de 850 MHz + Capacidad portadora en la banda de 1900 MHz (kbps)	<b>5690,99</b>	a + b
Número de canales simultáneos	<b>15</b>	

La capacidad total para la zona de estudio empleando tecnología HSUPA con tres frecuencias portadoras se detalla en la tabla a continuación.

**Tabla 5.21.** Número de usuarios y capacidad total de la zona de estudio para el *uplink* utilizando tres portadoras

Nro.	Nombre de la Radio Base	Sectores	Usuarios simultáneos	Throughput total (Mbps)
1	AMAZONAS	3	45	17,072
2	INAQUITO	3	45	17,072
3	BENALCAZAR	3	45	17,072
4	CAROLINA	3	45	17,072
5	TSE	2	30	11,381
6	CORDICARGAS	3	45	17,072
7	JARDIN	3	45	17,072
8	INTEROCEAN	3	45	17,072
9	REPUBLICA	1	15	5,690
	<b>Total</b>		<b>360</b>	<b>136,576</b>

#### 5.4.4 Cobertura de cada sector

Para determinar el tamaño de la célula se debe realizar un presupuesto de potencia en función de las características de los equipos empleados además se debe tener en cuenta las características del enlace, tal como se indica en la siguiente tabla.

**Tabla 5.22.** Presupuesto de potencia y máximas pérdidas tolerables

Enlace	Downlink	Uplink
Potencia Nodo B/Potencia Terminal móvil (dBm)	36	24
Potencia Canales Comunes (W)	3,6	---
Figura de ruido [dB]	7	4,4
Ganancia antena Nodo B [dBi]	17	17
Ganancia antena terminal móvil [dBi]	0	0
Pérdidas en cables [dB]	2,2	2,2
Margen de rápido desvanecimiento (Ganancia Macro diversidad) [dB]	1,7	3,8
Slow fading (log normal fading) [dB]	8,06	8,06
$\rho$ [dB] – Margen de interferencia	10	3
Pérdidas por penetración en edificaciones [dB]	22	22
Sensibilidad del receptor [dBm]	-126,2	-115
Máximas pérdidas tolerables [dB]	131,64	120,14

Utilizando el modelo COST-HATA del Anexo A1 y la ecuación 4.2 se determinaron los siguientes valores para la cobertura de una célula en la zona de estudio:

**Tabla 5.23.** Área de cobertura de un sector y cobertura por un BTS

Enlace	Máximas pérdidas [dB]	Radio de cobertura de cada sector (km)	Área de cobertura de un sector (km <sup>2</sup> )	Área de cobertura de una BTS $A_{BTS} = 3 \times A_{sector}$ (km <sup>2</sup> )
<i>Downlink</i>	131,64	1,1	3,14	9,43
<i>Uplink</i>	120,14	0,63	1,03	3,09

Se puede apreciar en la tabla 5.23 que la cobertura de la célula se encuentra limitada por el *uplink*, esto se debe a que el equipo terminal de usuario posee una menor potencia de transmisión así como también una menor sensibilidad comparada con la del Nodo B. Por lo tanto la cobertura de cada sector se verá limitada a 1,03 km<sup>2</sup>.

#### 5.4.5 Proyecciones a futuro

Si la tendencia en el incremento del número de usuarios analizado en la sección 4.5 se considera para la tecnología HSPA, para el mes de abril del año 2010 el número de usuarios en la zona de estudio será mayor a 150 con lo que la capacidad del sistema para el *downlink* utilizando una sola frecuencia portadora no será suficiente y se deberá recurrir al empleo de técnicas que permitan incrementar dicha capacidad o emplear un mayor número de portadoras. Por otra parte para el *uplink* el sistema alcanzaría su límite a finales del año 2009 por lo que el operador de prueba deberá considerar incrementar la capacidad de cada célula pues éstas como se indico se encuentran trabajando a un 50% de la carga total lo que implicaría disminuir el tamaño de la células hasta trabajar con un margen de interferencia máximo tolerable de 6 dB o que es lo mismo que la carga de la célula sea igual a 75%.

Si se emplea todo el ancho de banda disponible para la tecnología HSDPA, es decir si el operador de prueba emplea tres frecuencias portadoras la capacidad del sistema en la zona de estudio no será suficiente para noviembre del año 2010. Para el caso de HSUPA si se emplean 3 frecuencias portadoras la capacidad no será suficiente para octubre del 2010. Tanto para el *downlink* como para el *uplink* se considera que no se han instalado nuevas estaciones base ni se han empleado técnicas que incrementen la capacidad de cada célula. Para la tecnología HSPA no se realizó un análisis de tráfico empleando el modelo Erlang B debido a que se analizaron datos en tiempo no real no existirá bloqueo, motivo por el cual este tipo los modelos de tráfico probabilísticos como Erlang B no darán un resultado adecuado.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6.1 CONCLUSIONES**

- La aplicación de las especificaciones técnicas de la 3GPP para los sistemas UMTS permite a los fabricantes y operadores de esta tecnología lograr niveles de calidad y funcionamiento adecuados en los productos y servicios de tercera generación ofrecidos. Sin embargo las especificaciones de la 3GPP debido a que son elementos de desarrollo tecnológico son de carácter voluntario para ser aplicados por un fabricante, inclusive muchos de ellos han logrado perfeccionar y mejorar los parámetros técnicos especificados por la 3GPP.
- La capacidad de los sistemas UMTS no depende únicamente del ancho de banda que esta tecnología ocupa, sino que depende de una serie de parámetros técnicos importantes como la cantidad de energía que llega al dispositivo receptor, esquemas de modulación y codificación empleados, efectos producidos por la propagación multitrayectoria expresados en términos de ortogonalidad y debido a que WCDMA puede utilizar reuso de frecuencia igual a uno, la cantidad de interferencia es un factor muy importante a ser considerado. Varios de estos parámetros permiten determinar la eficiencia espectral teórica de la tecnología WCDMA a través de las denominadas ecuaciones de carga.
- La eficiencia espectral de un sistema de telecomunicaciones constituye un factor de gran importancia para el dimensionamiento de una red UMTS pues permite determinar la capacidad de dicho sistema y adicionalmente ayuda a desarrollar técnicas que ayudan a mejorar el desempeño del mismo. Determinar la eficiencia espectral de WCDMA es calcular el número de comunicaciones simultáneas con

una determinada tasa de transmisión en cada célula en los 5 MHz de ancho de banda que ocupa una frecuencia portadora para este tipo de tecnología.

- La capacidad de una célula en el *downlink* es más sensitiva a los efectos producidos por la propagación multitrayectoria, esto debido al empleo de códigos ortogonales en el enlace descendente para la diferenciación de los usuarios, por tal motivo en un ambiente de macro células y multitrayectorias la capacidad del *uplink* puede superar a la del *downlink* para un mismo factor de carga.
- Las ecuaciones de carga no determinan la capacidad máxima de una célula para el *downlink* si dicha célula se encuentra en un ambiente libre de interferencias y multi trayectos. El límite máximo de la capacidad para una célula con tecnología WCDMA en este entorno está dado por la cantidad de códigos ortogonales generados además de los esquemas de modulación y codificación de datos utilizados.
- La relación que existe entre la potencia de transmisión utilizada en el Nodo B y la capacidad de la célula no es lineal, por tal motivo no es adecuado elevar la potencia de transmisión a fin de incrementar el número de usuarios que puede soportar el sistema, en lugar de ello se debe aplicar técnicas como diversidad o división de potencia entre frecuencias, técnicas que a más de incrementar el *throughput* de la célula, también disminuyen los costos de implementación, siempre y cuando el operador cuente con el ancho de banda necesario.
- La cobertura de una célula con tecnología UMTS se encuentra limitada por el *uplink*, pues este enlace tolera una menor cantidad de pérdidas en el enlace debido a que una menor potencia de transmisión es empleada por el terminal móvil. Por otra parte la cobertura en el *downlink* es mucho más sensible a la capacidad de la célula pues al incrementar el número de usuarios existirá una menor potencia asignada a cada usuario y la cobertura de la célula disminuirá.
- La evolución hacia la denominada tercera generación y media mediante la implementación de la tecnología HSDPA para el enlace descendente permite incrementar el *throughput* del sistema y por ende el número de usuarios de una

manera significativa gracias a las mejoras realizadas en el sistema y el empleo de técnicas más eficaces. HSDPA ocupa la misma infraestructura y espectro que UMTS, motivo por el cual no requiere de inversiones significativas por parte de las operadoras para su implementación. La tendencia en nuestro país ha sido implementar UMTS junto con HSDPA logrando de esta manera ofrecer más y mejores servicios de una manera rápida y además se puede evitar pequeños cambios en la red en un futuro.

- El enlace ascendente de UMTS ha sido mejorado gracias a la desarrollo de la tecnología HSUPA la misma que al igual que HSDPA emplea la técnica de repetición HARQ lo que permite la rápida re-transmisión de los datos con fallas, que a su vez ayuda a reducir la demora en el tiempo de transmisión. Básicamente la implementación de HSUPA no afecta al nodo B y en el núcleo de la red principalmente requiere de una actualización de software. En términos generales la implementación de esta tecnología se realiza un par de años luego de la implementación de HSDPA, es decir cuando la red se estabilice y consiga una base de clientes y aplicaciones para poder explotar el servicio.
- Los sistemas UMTS pueden coexistir con sistemas móviles de generaciones anteriores o con otros operadores que empleen la tecnología UMTS. Sin embargo, se pudo verificar que la manera más eficiente en la que pueden trabajar estos sistemas es de una forma coordinada, es decir, que las estaciones base de las diferentes tecnologías u operadores se encuentren en la misma ubicación geográfica. Si un operador no se pusiere de acuerdo con otro para que sus sistemas trabajen coordinadamente, se debe evitar colocar las estaciones base en el borde de las células del sistema del otro operador pues esto ocasionaría altas pérdidas en la capacidad de ambos sistemas.
- Los servicios de tercera generación en el Ecuador han tenido una gran acogida, a tal punto que el número de usuarios ha tenido un crecimiento del 95% en el primer semestre del año 2009. Si este crecimiento se mantiene durante los próximos años y consideramos servicios en tiempo real con máximas tasas de transmisión para todos los usuarios en UMTS, la capacidad ya no será suficiente aproximadamente para el tercer trimestre del año 2010 y si consideramos transmisión de datos con la máxima

velocidad de transmisión ofertada por el operador de prueba con la tecnología HSDPA, la capacidad de la red será insuficiente para el segundo trimestre del año 2010.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- El ente regulador de las telecomunicaciones en el Ecuador (Ministerio de Telecomunicaciones) debe considerar analizar a detalle la situación de los operadores que emplean la tecnología UMTS/HSDPA, a fin de determinar si el ancho de banda que éstos tienen disponible es suficiente para dar un buen servicio a todos los usuarios a nivel nacional y en conjunto con la Superintendencia de Telecomunicaciones se puedan establecer mecanismos que permitan verificar si el dimensionamiento es el adecuado, todo con el fin de buscar siempre el beneficio del usuario final.
- El operador de prueba debería considerar el emplear una distribución de frecuencias tipo *sándwich* para las tecnologías UMTS y GSM a fin de evitar la interferencia proveniente de las redes de otros operadores con lo que se puede incrementar levemente la capacidad del sistema.
- Antes de que el operador de prueba empiece a ocupar una segunda portadora para la tecnología UMTS es conveniente que emplee técnicas que le permitan incrementar la capacidad del sistema, una de ellas es la diversidad en la transmisión que le daría dos beneficios al operador básicamente. El primero de ellos es incrementar el número de usuarios que puede soportar el sistema hasta en un 90% para el caso de peatones y hasta en un 20% para el caso de usuarios en vehículos. El segundo beneficio es que la implementación de diversidad sería un paso previo para el uso posterior de tres frecuencias portadoras en lo que se refiere a hardware, debido a que las estaciones base Huawei empleadas utilizan los mismos dispositivos ya sea para manejar diversidad o 3 frecuencias portadoras.
- Una vez que el operador de prueba disponga de las tres frecuencias portadoras analizadas, es recomendable que utilice las portadoras ubicadas en la banda de 850

MHz para la implementación de macro células y la portadora localizada en la banda de 1900 MHz para micro células, esto debido a que a una mayor frecuencia la propagación de la señal radioeléctrica es menor por tanto se tendrán menores coberturas para una célula.

- La tecnología UMTS y su evolución (HSPA) constituyen avance tecnológico extraordinario y que a diario es mejorado con nuevas e innovadoras propuestas. Una de ellas constituye el empleo de VoIP sobre las redes HSPA, lo que permite incrementar significativamente el número de usuarios de voz en el sistema. Por tanto se recomienda realizar un proyecto de grado en el que se analice y evalúe el desempeño de una red HSPA con el protocolo IP para brindar servicios en tiempo real.

## **ANEXO A1**

### **MODELO DE PROPAGACIÓN COST 231 - HATA**

## ANEXO A1

### MODELO DE PROPAGACIÓN COST 231 - HATA [56]

Una importante contribución de COST 231 (*Cooperation in the field of Scientific and Technical Research*) es el desarrollo de modelos de propagación para zonas urbanas en las bandas de 900 MHz y 1800 MHz. Los modelos propuestos se basan en aproximaciones de los autores Hata, Walfisch-Bertoni e Ikegami. A continuación detallaremos el modelo COST – 231 Hata pues es el más utilizado para sistemas de telecomunicaciones móviles en zonas urbanas.

#### MODELO COST 231 – HATA

Cuatro parámetros son utilizados para la estimación de las pérdidas en el conocido modelo de propagación de Okumura Hata; la frecuencia de operación ( $f$ ), la distancia ( $d$ ), altura de la antena de la estación base ( $h_{Base}$ ) y altura de la antena del dispositivo móvil ( $h_{móvil}$ ). Las pérdidas en la transmisión en este modelo en zonas urbanas se definen por la siguiente expresión:

$$L = 69.55 + 26.16 \log[f \text{ (MHz)}] - 13.82 \log[h_{Base} \text{ (m)}] - a[h_{móvil}] + [44.9 - 6.55 \log(h_{Base})] \cdot \log[d \text{ (km)}] \quad (\text{A1.1})$$

Donde:

$$a[h_{móvil}] = \{1.1 \log[f \text{ (MHz)}] - 0.7\} h_{móvil} \text{ (m)} - \{1.56 \log[f \text{ (MHz)}] - 0.8\} \quad (\text{A1.2})$$

Se debe tener en cuenta que el modelo de Okumura Hata presenta las siguientes restricciones:

- $f$ : 150 a 1000 MHz
- $h_{Base}$ : 30 a 200 m.
- $h_{móvil}$ : 1 a 10 m.
- $d$ : 1 a 20 km.

El Modelo COST ha extendido el modelo de Okumura Hata para los rangos de frecuencia de entre 1500 MHz y 2000 MHz debido al desarrollo especialmente de las telecomunicaciones móviles, y éste se conoce como el modelo COST – Hata, el cual se define mediante la siguiente expresión:

$$L = 46.3 + 33.9 \log[f(\text{MHz})] - 13.82 \log[h_{Base}(\text{m})] - a[h_{móvil}] + \{44.9 - 6.55 \log[h_{Base}(\text{m})]\} \log[d(\text{km})] + C_m \quad (\text{A1.3})$$

Donde:

$a[h_{móvil}]$  se define en la ecuación A2.2.

$C_m = 0 \text{ dB} \rightarrow$  Ciudades pequeñas y centros suburbanos

$C_m = 3 \text{ dB} \rightarrow$  Centros metropolitanos

El modelo de COST - Hata presenta las siguientes restricciones:

- $f$ : 1500 a 2000 MHz
- $h_{Base}$ : 30 a 200 m.
- $h_{móvil}$ : 1 a 10 m.
- $d$ : 1 a 20 km.

## **ANEXO A2**

### **HOJA TÉCNICA - ESTACIÓN BASE HUAWEI DBS 3800**

## ANEXO A2

### HOJA TÉCNICA - ESTACIÓN BASE HUAWEI DBS – 3800

#### WCDMA Distributed Base Station DBS3800

In areas with the difficulty of site acquisition such as the Europe, It is very expensive and complex to build a equipment room for communication equipments. This problem is more urgent for BTS because of the huge number of BTS.

DBS3800 is a new type of Node B with distributed structure, It features small size, large capacity, high integration to provide a zero footprint solution to fulfill the requirements of easier, fast installation and network deployment. This enables the operator to achieve radio coverage in urban areas, suburban areas, rural areas, expressways, railways, and hot spots.



#### Innovative Distributed Structure

DBS3800 consists of the baseband unit (BBU) and the radio remote unit (RRU). The standalone BBU and RRU are mounted separately to process baseband signals and RF signals respectively. The BBU connects to one or more RRUs by optical fiber, forming the architecture of a distributed Node B.

The BBU is a small-sized cassette, and can be mounted in any standard cabinet with free space that is 19 inches wide and 1 U high. No extra space is required which allows the operator to fully utilize free space even only very limited space is available.

The RRU supports outdoor installation, which features small size, light weight and can be mounted on a pole, a wall, a stand, or other place near antenna. The operator can also select other installation modes as required by actual situations. No equipment room or air conditioner is required. Therefore, RRU can be mounted quickly with lower cost.

#### Large Capacity, Abundant Services

One BBU can support up to 3 x 1 configuration to satisfy the requirement in 3G initial phase. And expand capacity up to 3x2 configuration with extension board, stacking BBU3806s can expand capacity up to 3 x 4 or 6 x 2 configuration.

DBS3800 can support multi-frequency band by different RRU for different frequency band. Because of the digital interface named CPRI between BBU and RRU, so BBU can be shared by all RRUs which support different frequency band.

DBS3800 can also support abundant services such as HSDPA, HSUPA and MBMS.

## High Performance and Advanced PA

With the 16-way RAKE receiver, the receive sensitivity is up to -126.2dBm with single antenna and no TMA. The output power of TOC is up to 40W. It is also support 4-way receive diversity and transmitting diversity. Based on these technologies, the coverage will be greatly improved. With the advanced RRM algorithm, DBS3800 can provide normal services for UE with high speed up to 430km/h.

With the application of DPD+Doherty, the PA power efficiency is up to 33%, the high power efficiency will lower the DBS3800's power consumption and the low power consumption can decrease the operator's OPEX, and enhance the system reliability.

## Flexible Network Deployment

DBS3800 provides multiple mode interfaces connected to the RNC, such as E1/T1, E3/T3, STM-1, and fast Ethernet (FE). It can support IP over E1/T1 or FE or ATM over E1/T1 or STM-1 or ATM/IP dual-stack for Iub interface. The Iub IP solution can help operator to save the transmission cost by up to 40%.

The Radio Network Controller (RNC) and DBS3800s can support multiple networking modes, for example, star, chain, tree, ring, and hybrid. The chain and tree networking modes support up to five levels of cascading.

The BBU and RRU3801Cs can also support multiple networking modes, such as star, chain, ring, and hybrid. It is support eight levels of cascaded RRU for easy network deployment. The largest distance of single-level cascading is 40 km, and that of multi-level cascading is 100 km.

## Key characteristics

- HSPA: 1.92Mbps(UL)/14.4Mbps(DL)
- Multi carrier Doherty PA
- Transmitting Diversity
- 4-way Receiving Diversity
- RET with AISG interface
- ATM/IP transmission
- Multi-band co-BBU

Technical Specification	
Full Frequency Range	1800MHz, 1900MHz, 2100MHz, 850M, 900M
Number of Cells	12 Cells
Number of Sectors	6 Sectors
Dimension (HxWxD)	BBU: 42x436x300 (mm), RRU: 610x380x200(mm)
Weight	BBU: 5 kg , RRU: 20kg
Output Power	40W
Max power consumption	BBU:60W, RRU:240W
Receiver Sensitivity	-126.2dBm (Single Antenna without TMA )
Power Supply	BBU:24VDC/-48VDC, RRU: -48VDC/220V AC
Temperature Range	BBU: -5~-55 °C, RRU: -40 to +50 °C

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cellular Technology, <http://www.novell.com/info/primer/prim08.html>, Fecha de consulta: Abril de 2009.
- [2] AMSAT, Espectro Extendido, [http://www.ea.amsat.org/a\\_ss/sld001.htm](http://www.ea.amsat.org/a_ss/sld001.htm), Vigo 1999, Fecha de consulta: Mayo de 2009.
- [3] Spread Spectrum Technology, <http://www.hometoys.com/htinews/aug01/articles/immunity/immunity.htm>, Agosto 2001, Fecha de consulta: Mayo de 2009
- [4] Spread Spectrum Systems, <http://cbdd.wsu.edu/kewlcontent/cdoutput/TR502/page74.htm>, Fecha de consulta: Mayo de 2009.
- [5] Kop, Carlo, An Introduction to Spread Spectrum Techniques, <http://www.csse.monash.edu.au/~carlo/SYSTEMS/Spread-Spectrum-0597.htm>, Mayo 1997, Fecha de consulta: Mayo de 2009.
- [6] Daoud, Michel, *Wireless Technology – Protocols, Standards, and Techniques*, Editorial CRC Press, Londres 21 de Diciembre de 2001.
- [7] TDMA (IS-54/13x), <http://www.leapforum.org/published/internetnetworkMobility/split/node44.html>, Fecha de consulta: Abril de 2009.
- [8] IS-136 TDMA Technology, <http://www.privateline.com/Cellbasics/hart-ch3IS-136.pdf>, Fecha de consulta: Abril de 2009.
- [9] Sistema Global para las Comunicaciones Móviles, <http://es.wikipedia.org/wiki/GSM>, Fecha de consulta: Abril de 2009.
- [10] Introducción a la tecnología GPRS, <http://www.34t.com/box-docs.asp?doc=521>, Fecha de consulta: Abril de 2009.
- [11] Telefonía Móvil 3G, <http://es.wikipedia.org/wiki/3G>, Fecha de consulta: Abril de 2009.
- [12] Ericsson, HSPA “High Speed Packet Acces”, [http://www.ericsson.com/technology/tech\\_articles/HSPDA.shtml](http://www.ericsson.com/technology/tech_articles/HSPDA.shtml). Fecha de consulta: Abril de 2009.

- [13] Unión Internacional de Telecomunicaciones, Actividades de la UIT en materia de IMT-2000, <http://www.itu.int/home/imt-es.html>, Fecha de consulta: Abril de 2009.
- [14] Unión Internacional de Telecomunicaciones, Requerimientos de un sistema de Tercera Generación, <http://www.imt-2000.org>, Fecha de consulta: Abril de 2009.
- [15] Vera, Arturo, Asignación del Espectro para IMT-2000 <http://www.monografias.com/trabajos15/telefonía-celular/telefonía-celular.shtml#ASIGNAC>, Fecha de consulta: Abril de 2009.
- [16] What is IMT-2000?, [http://www.itu.int/osg/imt-project/docs/What\\_is\\_IMT2000-2.pdf](http://www.itu.int/osg/imt-project/docs/What_is_IMT2000-2.pdf), Geneva 2002, Fecha de consulta: Abril de 2009.
- [17] Kaaranen, Heikki, *Redes UMTS, Arquitectura, movilidad y Servicios*, Segunda Edición, Editorial Alfaomega, México 2005.
- [18] Holma, Harry, *WCDMA for UMTS*, Tercera Edición, Editorial John Wiley & Sons Ltd., Inglaterra 2004.
- [19] Karim, M.R., *WCDMA and CDMA2000 for 3G mobile networks*, Editorial McGraw-Hill Telecom, Estados Unidos 2002
- [20] Handover, <http://es.wikipedia.org/wiki/Handover>, Fecha de consulta: Mayo de 2009.
- [21] Becvar, Z, Comparison of Handovers in UMTS and WiMax, [http://fireworks.intranet.gr/Publications/Fireworks\\_6CTUPB005a.pdf](http://fireworks.intranet.gr/Publications/Fireworks_6CTUPB005a.pdf), Fecha de consulta: Mayo de 2009.
- [22] Dinan, Esmael, UMTS radio interface, system planning and optimization <http://www.scribd.com/doc/7090616/UMTS-Radio-Interface-System-Planning-and-Optimization>, Diciembre 2002, Fecha de consulta: Mayo de 2009.
- [23] Huélamo, Javier, Visión Arquitectural de la Tercera Generación de Móviles UMTS, [http://www.umtsforum.net/mostrar\\_articulos.asp?u\\_action=display&u\\_log=15](http://www.umtsforum.net/mostrar_articulos.asp?u_action=display&u_log=15), Madrid 1997, Fecha de consulta: Mayo de 2009.
- [24] <http://ceres.ugr.es/%7Ealumnos/alonso/p3.html>, Fecha de consulta: Mayo de 2009.
- [25] Sánchez, Matilde, Codificación de canal. Turbocodificación, [http://www.tsc.uc3m.es/~mati/Docencia/TC/codificacion\\_canal.pdf](http://www.tsc.uc3m.es/~mati/Docencia/TC/codificacion_canal.pdf), Fecha de consulta: Mayo de 2009.
- [26] Especificación Técnica 3GPP TS 25.212 Versión 4.6.0 (Release 4), Multiplexación y codificación de canal (FDD). Septiembre de 2002. Fecha de consulta Mayo de 2009.

- [27] Especificación técnica 3GPP TS 34.121 Versión 6.0.0 (Release 6), Radio transmisión y recepción (FDD). Marzo de 2005. Fecha de consulta: Mayo de 2009.
- [28] SKLAR, Bernard, *Digital Communications – Fundamentals and Applications*, Segunda Edición, Editorial Prentice Hall, Estados Unidos Octubre de 2001
- [29] Especificación Técnica 3GPP TS 25.104 Versión 7.0.0 (Release 7), Estación Base – Radio transmisión y recepción (FDD). Junio de 2005.
- [30] Especificación técnica 3GPP TS 25.101 Versión 6.12.0 (Release 6), Equipo de Usuario – Radio transmisión y recepción (FDD). Junio de 2006.
- [31] Zigangirov, Kamil, *Theory of Code Division Multiple Access Communication*, Editorial John Wiley & Sons Ltd e IEEE press, Abril de 2004.
- [32] Cauwenberge, Van, Study of soft handover in UMTS, [http://oldwww.com.dtu.dk/research/networks/OPNET/UMTS\\_handover.pdf](http://oldwww.com.dtu.dk/research/networks/OPNET/UMTS_handover.pdf), 31 de Julio de 2003, Fecha de consulta: Julio de 2009.
- [33] UMTS RAN, <http://www.umtsworld.com/technology/ran/ran.htm>, 2004, Fecha de consulta: Julio de 2009.
- [34] Braithwaite, Chris, *UMTS network Planning and Development*, Segunda edición, Editorial Elsevier Science, February 2009
- [35] Unidad Erlang, [http://es.wikipedia.org/wiki/Unidad\\_Erlang](http://es.wikipedia.org/wiki/Unidad_Erlang), Fecha de consulta: Junio de 2009
- [36] Rahnema, Moe, *UMTS network planning, optimization, and inter-operation with GSM*, Editorial John Wiley & Sons Ltd (Asia), Singapore 2008
- [37] Proyecto PORTA - UMTS Quito, Base de Datos de la Dirección General de Gestión del Espectro Radioeléctrico (DGER) – SENATEL. Fecha de consulta: Septiembre de 2009.
- [38] Leavey, Gerry, Enabling Distributed Base Stations Architectures, [http://www.ed-china.com/ARTICLES/2006MAY/3/2006MAY19\\_NC\\_NETD\\_TS\\_1.PDF?SOURCES=DOWNLOAD](http://www.ed-china.com/ARTICLES/2006MAY/3/2006MAY19_NC_NETD_TS_1.PDF?SOURCES=DOWNLOAD), Febrero de 2006. Fecha de consulta: Septiembre de 2009.
- [39] Huawei technologies, DBS3800 System description. Fecha de consulta: Septiembre de 2009.
- [40] Nokia USA, Nokia 5800 Xpress Music specifications, <https://www.nokiausa.com/find-products/phones/nokia-5800-xpressmusic/specifications> Fecha de consulta: Septiembre de 2009.
- [41] Nokia Europa, Nokia E71 specifications, <http://europe.nokia.com/find-products/devices/nokia-e71/specifications>. Fecha de consulta: Septiembre de 2009.

- [42] Sony Ericsson Reino Unido, MD300 Mobile Broadband USB Modem, <http://www.sonyericsson.com/cws/support/mobilebroadband/md300?lc=en&cc=gb>. Fecha de consulta: Septiembre de 2009.
- [43] Huawei, Módem USB E160, <http://www.huawei.com/mobileweb/en/products/view.do?id=1960>. Fecha de consulta: Septiembre de 2009.
- [44] Wolf, Josef, Measurement of Adjacent Channel Leakage Power on 3GPP W-CDMA Signals with the FSP, [http://www2.rohde-schwarz.com/file\\_1516/1EF41\\_0E.pdf](http://www2.rohde-schwarz.com/file_1516/1EF41_0E.pdf), Fecha de consulta: Septiembre de 2009.
- [45] Reporte técnico 3GPP TR 25.816 (*Release 7*), Reporte técnico de trabajo UMTS en 900 MHz. Diciembre de 2005. Fecha de Consulta: Septiembre de 2009.
- [46] Electronic Communications Committee (ECC), Compatibility study for UMTS operating within the GSM 900 and GSM 1800 frequency bands. <http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/ECCREP082.PDF>, Roskilde, Mayo de 2006. Fecha de Consulta: Septiembre de 2009.
- [47] Thompson, D., Modeling adjacent channel interference, [http://www.macltd.com/datafile\\_downloads/MAC%20Ltd%20-%20Modelling%20ACI%20in%203G%20Networks.pdf](http://www.macltd.com/datafile_downloads/MAC%20Ltd%20-%20Modelling%20ACI%20in%203G%20Networks.pdf), Escocia, Abril de 2003. Fecha de consulta: Septiembre de 2009.
- [48] Base de datos DGGER-SENATEL, Radio bases UMTS autorizadas para CONECEL, Agosto de 2009. Fecha de consulta: Septiembre de 2009.
- [49] Smith, Clint, *3G wireless networks*, Segunda edición, Editorial McGraw-Hill, New York 2007.
- [50] Dirección General de los Servicios de Telecomunicaciones (DGSST) – SENATEL, Estadística de servicios de telefonía móvil, julio de 2009. Fecha de consulta: Septiembre de 2009.
- [51] EDUFUTURO - Prefectura de la Provincia de Pichincha, Cantón Quito, <http://www.edufuturo.com/educacion.php?c=2326>, Pichincha-Ecuador, 2006. Fecha de consulta: Septiembre de 2009.
- [52] Ilustre Municipio de Rumiñahui, Datos generales Cantón Rumiñahui, [http://www.ruminahui.gov.ec/informacion.asp?ID\\_INF=89&SEC\\_INF=RUMINAHUI](http://www.ruminahui.gov.ec/informacion.asp?ID_INF=89&SEC_INF=RUMINAHUI), Ecuador 2007. Fecha de consulta: Septiembre de 2009.
- [53] Holma, Harry, *HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications*, Primera Edición, Editorial John Wiley & Sons Ltd., Inglaterra 2006.
- [54] Recomendación ITU-R M.1225, Parámetros para evaluación de tecnologías de transmisión de radio para IMT-2000, Fecha de Consulta: Agosto de 2009.

[55] Especificación técnica 3GPP TS 25.101 Versión 7.7.0 (Release 7), Equipo de usuario – Radio transmisión y recepción. Marzo de 2007. Fecha de consulta: Agosto de 2009.

[56] Wagemakers, Alexander, Modelos de propagación electromagnética en entorno urbano, <http://www.escet.urjc.es/~fisica/Docencia/ITeleco/tema3.pdf>, 29 de octubre de 2007. Fecha de consulta: Agosto de 2009.

## **ACTA DE ENTREGA**

El proyecto fue entregado en el Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Escuela Politécnica del Ejército desde:

Sangolquí, a \_\_\_\_\_

**Elaborado por:**

---

Sr. Henry Ramiro Carvajal Mora

**Autoridad:**

---

Ing. Gonzalo Olmedo, Ph.D  
Director de la Carrera de Ingeniería  
en Electrónica y Telecomunicaciones