



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**AUTOR: VEGA AYO, JUAN ALEXIS**

**TEMA: ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE  
BANDA ANCHA PARA OFRECER SERVICIOS DE VOZ Y DATOS  
EN LAS COMUNIDADES DEL MILENIO**

**DIRECTOR: Ph.D. ESPINOSA, NIKOLAI  
CODIRECTOR: Ph.D. OLMEDO, GONZALO**

**SANGOLQUÍ, OCTUBRE 2014**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE  
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CERTIFICADO**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Dr. Nikolai Espinosa, Ph.D,

Dr. Gonzalo Olmedo, Ph.D

**CERTIFICAN**

DECLARO QUE:

Que el trabajo titulado “ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE BANDA ANCHA PARA OFRECER SERVICIOS DE VOZ Y DATOS EN LAS COMUNIDADES DEL MILENIO”, realizado por el Sr. Juan Alexis Vega Ayo, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

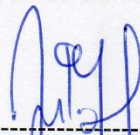
Las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyos fuentes se incorporan en la bibliografía.

Debido a que se trata de un trabajo de investigación recomiendan su publicación.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo por el alcance científico del proyecto de grado en mención.

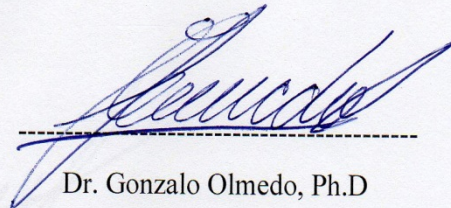
Sangolquí, 29 de Octubre de 2014

Sangolquí, 29 de Octubre de 2014



Dr. Nikolai Espinosa, Ph.D

DIRECTOR



Dr. Gonzalo Olmedo, Ph.D

CODIRECTOR

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE  
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

AUTORIZACIÓN

Yo, Juan Alexis Vega Ayo

Yo, Juan Alexis Vega Ayo

**DECLARO QUE:**

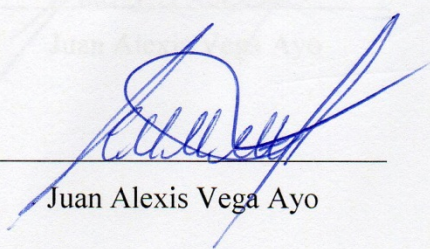
Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación en la

El proyecto de grado denominado “ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE BANDA ANCHA PARA OFRECER SERVICIOS DE VOZ Y DATOS EN LAS COMUNIDADES DEL MILENIO”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 29 de Octubre de 2014



---

Juan Alexis Vega Ayo

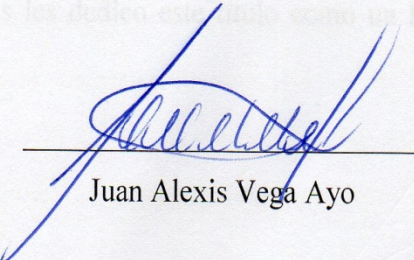
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE  
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, Juan Alexis Vega Ayo

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE BANDA ANCHA PARA OFRECER SERVICIOS DE VOZ Y DATOS EN LAS COMUNIDADES DEL MILENIO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 29 de Octubre de 2014

  
Juan Alexis Vega Ayo

## DEDICATORIA

El actual proyecto de grado se lo dedico en primer lugar a nuestro Señor Dios que siempre me ha acompañado durante toda mi vida estudiantil.

A mis valiosos padres que con su cariño, amor y confianza estuvieron siempre pendientes de mí. A mi padre Carlos que con su ejemplo, dedicación y esfuerzo me ha servido como un ejemplo de vida al cual le debo todo lo que soy. A mi madre Guadalupe quien me enseñó que en esta vida todo se logra con el trabajo arduo, la responsabilidad y el respeto hacia nuestros semejantes.

A mi hermano Carlos Andrés con quien ha estado conmigo en los momentos de alegría y de tristeza. Su experiencia y su madurez me han servido de guía para afrontar todo desafío que se me ha presentado y sobre todo por su valiosa amistad.

A mis compañeros y amigos de universidad por estar en todos momentos, sean de dicha o de pena pero su compañía y apoyo fueron fundamentales en todos los años que estuvimos en la universidad.

A mis seres queridos que se encuentran a lado de nuestro señor pero de manera muy especial a mi Tía Carmita y a mi abuelita Angelita quienes representan el esfuerzo y el cariño que han forjado dentro de cada uno de los integrantes de nuestra familia. A mis angelitas les dedico este título como un homenaje póstumo por su entrega y amor.

*Juan Alexis Vega Ayo.*

## **AGRADECIMIENTO**

Mis sinceros agradecimientos:

A Dios quien gracias a él nos debemos todo, por sus bendiciones, por su gran apoyo, en las buenas y en las malas es quien me ha dado fuerzas para terminar esta tesis.

A mí querida familia a quien le debo todo lo que soy. A mi padre Carlos Enrique que representa mi ejemplo y mi motivación personal y profesional. A mi madre María Guadalupe que siempre estuvo pendiente de mí. A mi hermano mayor Carlos Andrés por estar como un gran amigo en toda circunstancia.

A mis compañeros y amigos de universidad por todas las experiencias y vivencias que hemos tenido a lo largo de la carrera universitaria. Les agradezco su compañía, su apoyo y su confianza por lo que les deseo lo mejor en su vida profesional.

A mi Director y Co-Director de Tesis Dr. Nikolai Espinoza PhD y Dr. Gonzalo Olmedo PhD a quienes les agradezco infinitamente por su confianza, respaldo y guía en este proyecto de grado. Mi gratitud y amistad eterna a ustedes por toda su gran ayuda.

A mi querida Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, cuya institución me abrió las puertas para encaminarme en el ámbito profesional. A mis familiares y seres queridos que estuvieron en cada momento con sus intenciones y buenos deseos. A todos ustedes les aprecio y que sigamos adelante en cada uno de nuestros objetivos.

## INDICE DE CONTENIDOS

GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	xv
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación e Importancia.....	4
1.3. Alcance del proyecto .....	6
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1. Objetivo General .....	7
1.4.2. Objetivos Específicos.....	8
CAPÍTULO II .....	9
FUNDAMENTO TEÓRICO .....	9
2.1. Evolución de las Redes Celulares.....	9
2.1.1. Evolución de las Redes CDMA .....	11
2.1.2. Evolución de las redes GSM, UTMS y LTE.....	17
2.2. Sistemas Celulares CDMA.....	25
2.2.1. Definición.....	25
2.2.2. Características y Tecnologías de CDMA .....	31
2.2.3. Arquitectura de Red .....	34
2.2.4. Modelo de Referencia del Sistema CDMA2000.....	42
2.2.5. Capa Física .....	42
2.2.6. Capa de Enlace.....	45
2.2.7. Capas Superiores.....	47
2.3. LTE.....	48
2.3.1. Definición.....	48
2.3.2. Requisitos y Objetivos de LTE .....	49
2.3.3. Tecnologías en la Interfaz de Radio.....	55
2.3.4. Arquitectura de Red .....	61

2.3.5. Interfaz Radio.....	65
2.3.6. Capa Física.....	69
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>71</b>
<b>ANÁLISIS DE LAS REDES INALÁMBRICAS RURALES .....</b>	<b>71</b>
3.1. Caso de Estudio: Comunidades del Milenio .....	71
3.1.1. Análisis de Mercado.....	71
3.1.2. Análisis del Perfil Geográfico.....	76
3.1.3. Redes de Telecomunicaciones existentes en las comunidades .....	77
3.2. Análisis de la Banda de Frecuencias para las redes CDMA y LTE en el Ecuador.....	79
3.2.1. Redes CDMA .....	81
3.2.2. Redes LTE.....	87
3.3. Redes CDMA 450 MHz y LTE desarrolladas en el Ecuador.....	90
3.3.1. Red CDMA 450 MHz de la empresa ETAPA .....	90
3.3.2. Red CDMA 450 MHz de la Empresa CNT EP.....	93
3.3.3. Red LTE 1700 MHz de la Empresa CNT EP .....	94
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>99</b>
<b>DISEÑO DE LAS REDES INALÁMBRICAS CDMA 450 MHZ Y LTE 700 MHZ EN LAS COMUNIDADES DEL MILENIO .....</b>	<b>99</b>
4.1. Cobertura .....	99
4.1.1. Cálculo del Link Budget .....	106
4.1.2. Cálculo de las Pérdidas de los Enlaces .....	128
4.1.3. Simulación de las Redes CDMA y LTE en la herramienta SIRENET .....	129
4.2. Dimensionamiento de la Red Celular.....	140
4.2.1. Geometría de la Red Celular .....	140
4.3. Cálculo de la Capacidad de la Red.....	144
4.3.1. Cálculo de la Capacidad de la Red CDMA.....	144
4.3.2. Cálculo de la Capacidad de la Red LTE .....	152
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>160</b>



ANÁLISIS DE INTEROPERABILIDAD, MERCADO Y DESEMPEÑO DE LAS REDES .....	160
5.1. Análisis de los KPI (Key Performance Indicators) .....	160
5.1.1. Redes CDMA EV-DO.....	160
5.1.2. Redes LTE.....	162
5.2. Interoperabilidad de la Red CDMA 450 MHz con la red LTE 700 MHz.....	168
5.3. Análisis de Mercado .....	170
5.3.1. CDMA 450 MHz Rev. 0 .....	172
5.3.2. APT LTE 700 MHz.....	174
5.4. Análisis Comparativo entre redes CDMA y LTE .....	176
CAPÍTULO VI.....	178
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	178
6.1. Conclusiones.....	178
6.2. Recomendaciones .....	179
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	181

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de las redes CDMA2000 .....	17
Figura 2. Arquitectura del Sistema GSM.....	19
Figura 3. Arquitectura de la red UTMS .....	21
Figura 4. Técnicas de Acceso Múltiple.....	26
Figura 5. Esquema de la Red CDMA2000.....	35
Figura 6. Modelo de Referencia de la Arquitectura EV-DO .....	39
Figura 7. Estructura de una Red CDMA 450.....	40
Figura 8. Estructura del Modelo OSI para la tecnología CDMA2000.....	43
Figura 9. Señal OFDM en el dominio de la frecuencia y el tiempo.....	57
Figura 10. Un ejemplo de programación del canal dependiente entre dos usuarios..	58
Figura 11. Comparación entre las Tecnologías OFDMA y SC-FDMA.....	59
Figura 12. Tres Beneficios Fundamentales de las Múltiples Antenas: (a) Diversidad en la Ganancia. (b) Ganancia del Array (Arreglo o Matriz). (c) Ganancia de la multiplexación espacial. ....	60
Figura 13. Arquitectura de Red LTE EPS.....	61
Figura 14. Arquitectura LTE E-UTRAN .....	63
Figura 15. Torre de Protocolos de la Interfaz Aire del Sistema LTE .....	67
Figura 16. Vista Aérea de la Comunidad del Milenio Pañacocha .....	72
Figura 17. Entrada a la Comunidad Playas de Cuyabeno .....	73
Figura 18. Campo de Explotación Petrolífera Pañacocha.....	74
Figura 19. Ubicación y Tipos de Bosques de la Reserva de Producción Faunística Cuyabeno.....	77
Figura 20. Ruta del Ducto Pañacocha que atraviesa los campos petrolíferos de Pañacocha y El Edén .....	78

Figura 21. Cobertura de la Red HSPA+ de la CNT EP en el Campo Petrolífero Bloque 12 EPF.....	79
Figura 22. Plan de Canalización de APT (A5) para la banda de frecuencias de 700 MHz .....	88
Figura 23. Canalización de las bandas de frecuencia de 700 MHz, AWS 1700/2100 MHz y 2500 MHz adoptado por el CONATEL .....	90
Figura 24. Mapa de la Cobertura de la Red CDMA 450 de la empresa ETAPA en el Cantón Cuenca .....	92
Figura 25. Gráfico Comparativo de la SENATEL que muestra la distribución y el número de radiobases instalados por la empresa ETAPA en la red CDMA 450 .....	92
Figura 26. Distribución por provincias de las radiobases instaladas con tecnología CDMA 450 MHz de la CNT EP .....	94
Figura 27. Mapa Físico del Ecuador Continental que muestra la cobertura de la red CDMA 450 MHz otorgada por la CNT EP.....	95
Figura 28. Cobertura de la Red LTE 4G de la CNT EP en los sectores Sur y Centro de la Ciudad de Quito y los valles de Cumbaya y Tumbaco.....	96
Figura 29. Cobertura de la Red LTE 4G de la CNT EP en el sector Norte de Quito	96
Figura 30. Cobertura de la Red LTE 4G de la CNT EP en el Sector Sur Oeste de Guayaquil .....	97
Figura 31. Cobertura de la Red LTE 4G de la CNT EP en el Sector Centro de Guayaquil y en Duran.....	97
Figura 32. Cobertura de la Red LTE 4G de la CNT EP en el Sector Norte de Guayaquil .....	98
Figura 33. Método del Arista Dominante .....	105
Figura 34. Pérdidas por Difracción por Filo de Cuchillo.....	106
Figura 35. Gráfico de la Distribución de la Probabilidad Normal Acumulada vs. Porcentaje del Área de Cobertura.....	114
Figura 36. Simulación de la Red de Voz CDMA 450 MHz en las Comunidades del Milenio mediante el Modelo de Propagación de Okumura Hata.....	132

Figura 37. Simulación de la Red de Voz CDMA 450 MHz en las Comunidades del Milenio mediante el Modelo de Propagación de Deygout.....	133
Figura 38. Simulación de la Red de Datos CDMA 450 MHz en las Comunidades del Milenio mediante el Modelo de Propagación de Okumura Hata.....	134
Figura 39. Simulación de la Red de Datos CDMA 450 MHz en las Comunidades del Milenio mediante el Modelo de Propagación de Deygout.....	135
Figura 40. Simulación de la Red de Datos APT LTE 700 MHz en las Comunidades del Milenio mediante el Modelo de Propagación de Okumura Hata .....	136
Figura 41. Simulación de la Red de Datos APT LTE 700 MHz en las Comunidades del Milenio mediante el Modelo de Propagación de Deygout.....	137
Figura 42. Perfil de Línea de Vista desde Pañacocha hasta Playas de Cuyabeno ...	138
Figura 43. Esquema de los Procesos a seguir dentro de la Planificación de las Redes Celulares.....	141
Figura 44. Retícula de Planificación de una Célula Omnidireccional .....	143
Figura 45. Solución de la Interconexión de las redes CDMA2000 EV-DO y LTE.	169

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sub-Comités creados por la TIA.....	13
Tabla 2. Especificaciones de la 3GPP desde las redes UTMS hasta LTE .....	25
Tabla 3. Tabla Comparativa de las Bandas de Frecuencia en CDMA y su Cobertura .....	31
Tabla 4. Resumen de los requerimientos clave del Release 8 de LTE .....	51
Tabla 5. Canalización en el Sistema LTE .....	70
Tabla 6. Asignación de Fondos de las Utilidades de la Empresa Petroamazonas EP a las Comunidades del Milenio .....	74
Tabla 7. Asignaciones de las Sub-bandas referentes a la banda de 1900 MHz por parte de la CONATEL .....	81
Tabla 8. Tabla Comparativa de las Redes de Datos Móviles Instaladas en el Ecuador .....	83
Tabla 9. Plan Nacional de Frecuencias en el Rango de 450 – 470 MHz .....	84
Tabla 10. Distribución de la Sub-Banda A-A’ en la Banda de 450 MHz especificado según la canalización NMT-450.....	86
Tabla 11. Cuadro de Atribuciones del Plan Nacional de Frecuencias modificado por el CONATEL para el uso de la tecnología LTE 700 MHz.....	89
Tabla 12. Cobertura de la red CDMA de ETAPA en las parroquias rurales de Cuenca asociadas a su respectiva celda.....	91
Tabla 13. División de las 3 Fases del Proyecto CDMA 450 MHz de la CNT EP.....	93
Tabla 14. Valores de la Ganancia del Canal de Tráfico para diferentes calores de velocidad de datos .....	108
Tabla 15. Valores de las ganancias para el cálculo del Traffic Channel Ratio.....	109
Tabla 16. Cálculo de la Potencia Máxima de Transmisión con los parámetros del canal.....	109

Tabla 17. Cálculo del EIRP en el Transmisor para el Link Budget CDMA Reverse Link.....	110
Tabla 18. Parámetros del Receptor en el cálculo del Link Budget CDMA Reverse Link.....	113
Tabla 19. Valores Típicos de Pérdida de Penetración de la Señal en las Edificaciones .....	115
Tabla 20. Parámetros del Canal en el cálculo del Link Budget CDMA Reverse Link.....	116
Tabla 21. Cálculo del EIRP en el Transmisor para el Link Budget CDMA Forward Link.....	120
Tabla 22. Parámetros del Receptor en el cálculo del Link Budget CDMA Forward Link.....	121
Tabla 23. Parámetros del Canal en el cálculo del Link Budget CDMA Forward Link.....	122
Tabla 24. Cálculo del EIRP en los enlaces descendente y ascendente en LTE .....	123
Tabla 25. Cálculo de la Sensibilidad de Desvanecimiento Efectiva en el Receptor.....	125
Tabla 26. Cálculo del MAPL para LTE en los Enlaces Ascendente y Descendente. ....	127
Tabla 27. Especificaciones de Diseño de las redes CDMA y LTE para el cálculo de las pérdidas por el Modelo de Okumura Hata.....	128
Tabla 28. Parámetros Técnicos utilizados en la Simulación de las Redes CDMA 450 .....	130
Tabla 29. Parámetros Técnicos utilizados en la Simulación de las Redes LTE APT 700.....	131
Tabla 30. Medición del Tráfico por Abonado en las horas pico de los abonados del Sector Quito Centro por parte de la CNT E.P.....	146
Tabla 31. Número de Habitantes de las Comunidades del Milenio.....	147
Tabla 32. Cálculo de la Demanda Futura y del Tráfico Total de la Red.....	148
Tabla 33. Modulación y el Índice TBS para los canales PDSCH y PUSCH.....	153

Tabla 34. Tabla del Tamaño del Bloque de Transporte.....	154
Tabla 35. Valores de la Eficiencia Espectral especificados por la 3GPP .....	156
Tabla 36. Throughput de los enlaces Downlink y Uplink para una red LTE 700 MHz para un entorno Suburbano .....	159
Tabla 37. KPIs de Accesibilidad.....	163
Tabla 38. KPIs de Retención.....	164
Tabla 39. KPIs de Integridad .....	165
Tabla 40. KPIs de Disponibilidad .....	166
Tabla 41. KPIs de Movilidad .....	167
Tabla 42. Disponibilidad de Teléfono Convencional en las parroquias de Pañacocha y Playas de Cuyabeno .....	171
Tabla 43. Disponibilidad de Internet en las parroquias de Pañacocha y Playas de Cuyabeno.....	172
Tabla 44. Desarrollo de la tecnología CDMA 450 a lo largo de América Latina y el Caribe .....	173
Tabla 45. Número de Modelos de Dispositivos Móviles CDMA 450 con su respectiva Tecnología.....	174

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2
4G	Fourth Generation Wireless Systems
3G	Third Generation Wireless Systems
2G	Second Generation Wireless Systems
1G	First Generation Wireless Systems
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AN	Access Network
APT	Asia-Pacific Telecommunity
AT	Access Terminal
AWGN	Additive White Gaussian Noise
AWS	Advanced Wireless Services
BMC	Broadcast/Multicast Control
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station
CAPEX	Capital Expenditure
CDMA	Code Division Multiple Access
CDMA2000 1x RTT	CDMA2000 1 Times Radio Technology Transmission
CDMA2000 1x EV-DO	CDMA2000 1X Evolution Data Optimized
CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0	CDMA2000 1X EV-DO Revision 0
CDMA2000 1x EV-DO Rev. A	CDMA2000 1X EV-DO Revision A
CDMA2000 1x EV-DO Rev. B	CDMA2000 1X EV-DO Revision B
CNT	Corporación Nacional de Telecomunicaciones
CSN	Circuit Switching Node
DRC	Digital Rate Control
DSC	Digital Source Channel
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution



eHRPD	Evolved High Rate Packet Data
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
EPS	Evolved Packet System
EPC	Evolved Packet Core
EVRC-B	Enhanced Variable Rate Codec B
ENodeB	Enhanced NodeB
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	GPRS Tunneling Protocol
HARQ	Hybrid Automatic Repeat request
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IMS	IP Multimedia Subsystem
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
IP	Internet Protocol
IS-95	Interim Standard 95
ITU	International Telecommunication Union
ISDB-T	Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial
J-TACS	Japanese Total Access Cellular System
KPI	Key Performance Indicators
LAC	Link Access Control
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MAPL	Maximum Allowable Path Loss

MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MRC	Maximal-Ratio Combining
MSC	Mobile Switching Centre
NAS	Non-Access Stratum
NF	Noise Floor
NMS	Network Management System
NMT	Nordic Mobile Telephony
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OPEX	Operating Expense
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDSCH	Physical Downlink Share Channel
PDN-GW	Packet Data Network Gateway
PSN	Packet Switching Node
PSTN	Public Switched Telephone Network
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RB	Radio Bearer
RB	Resource Block
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control
RRI	Reverse Rate Indicator
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access

SFR	Soft Frequency Reuse
S-GW	Serving Gateway
SNR	Signal to Noise Ratio
TBS	Transport Block Size
TCHR	Traffic Channel Ratio
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TIA	Telecommunications Industry Association
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VHF	Very High Frequency
VoIP	Voice over IP
VSAT	Very Small Aperture Terminal
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

## RESUMEN

En el presente proyecto se realiza el diseño de redes móviles que permitan ofrecer los servicios de voz y datos en las Comunidades del Milenio. La necesidad de ofrecer servicios de telecomunicaciones a los sectores rurales más alejados de nuestro país requiere el diseño y la investigación previa sobre las tecnologías que resultarán útiles y factibles para ofrecer a los habitantes de las zonas rurales los servicios de Banda Ancha Móvil y de Voz que permita la comunicación y el desarrollo de las Comunidades. Dentro de este proyecto se han diseñado dos tecnologías móviles como son las redes CDMA 450 y APT LTE 700 cuyas especificaciones son válidas para el diseño de redes móviles en un entorno rural. Para tal objetivo se requiere realizar el cálculo del Presupuesto del Enlace o Link Budget que permitirá obtener la Máxima Pérdida Admisible del Enlace. Esta pérdida resulta útil dentro del cálculo del dimensionamiento de la célula. La determinación de los parámetros técnicos obtenidos en el Link Budget dentro del transmisor (EIRP), medio y receptor (sensibilidad) requieren ser tomados en cuenta dentro de la simulación de las redes móviles. También se incluyen los estudios empíricos y teóricos del cálculo del Throughput, Tráfico y Eficiencia Espectral de cada una de las redes móviles. Finalmente se debe tomar en cuenta los indicadores económicos, de rendimiento e interoperabilidad de dichas redes.

**Palabras Clave:** Redes Móviles, Link Budget, Propagación, CDMA, LTE

## ABSTRACT

In this project the design of mobile networks which provide voice and data services on the Millennium Communities is performed. The need to provide Telecommunications Services to the most remote rural areas of our country requires the design and previous research on technologies that will be useful and feasible to provide to the inhabitants of rural areas the services of Mobile Broadband and Voice that enable the communication and the development of communities. Within this project has designed two mobile technologies such as CDMA 450 and APT 700 LTE networks whose specifications are valid for the design of mobile networks in a rural environment. For this objective requires the calculation of the Link Budget that would permit to get the Maximum Allowable Path Loss. This loss is useful in the calculation of the cell dimensioning. The determination of technical parameters obtained in the Link Budget within the transmitter (EIRP), medium and receiver (sensitivity) need to be taken into account in the simulation of mobile networks. Empirical studies and theoretical calculation of Throughput, Traffic and Spectral Efficiency of each of the mobile networks are also included. Finally, we must take into account economic indicators, performance and interoperability of such networks.

**Key Words:** Mobile Networks, Link Budget, Propagation, CDMA, LTE

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Las comunicaciones móviles se han convertido en uno de los campos de investigación e implementación más desarrollados a lo largo de las telecomunicaciones y sus ciencias afines. La evolución de las tecnologías móviles ha ido de la mano con los beneficios que pueden ofrecer y esto se refleja en los niveles de calidad de servicio que brindan las operadoras de servicios a los usuarios tanto en cobertura, calidad de servicio de voz y datos, tasas de transmisión, uso adecuado de los espectros de frecuencia y otros requerimientos técnicos con el fin de llegar a otorgar los diversos servicios de las redes móviles de forma segura y confiable.

Las redes móviles proveen de múltiples servicios en los cuales se destaca el servicio de portadoras de voz como servicio mayoritario en cuanto a los usuarios a nivel rural. Dentro del plano urbano el servicio de datos móviles muestra una mayor tendencia de parte de sus clientes quienes buscan tener una comunicación permanente con el resto de usuarios y últimamente con los servicios que ofrece Internet (redes sociales, chat en línea, servicios multimedia, etc.). Mientras que a nivel rural y sobre todo en las comunidades más alejadas del perímetro urbano las comunicaciones inalámbricas resultan ser novedosas y su utilización se basa solamente en las comunicaciones de voz y datos de baja velocidad.

En el Ecuador actualmente están implementadas las redes celulares de segunda y tercera generación (2G GSM – 3G UTMS, HSPA, HSPA+) (Sesia & Toufik, 2009) pero también han estado involucradas las redes CDMA2000 (Code División Multiple Access) (Etemad, 2004) cuya utilización tuvo su plano trascendente por la empresa

OTECEL hasta el año 2011, donde decidieron poner fin a la tecnología antes mencionada debido al alto costo de mantenimiento y operación (CONATEL, 2013). Dentro de las redes de segunda generación han tenido un alcance global dentro del territorio nacional ya que los servicios que ofrecen los operadores han llegado a ofrecer los servicios de voz a casi todos los pueblos y recintos a nivel rural. En cuanto a las tecnologías de tercera generación han tenido dos enfoques en cuanto a la velocidad de transferencia de datos y la cobertura del servicio. La transferencia de datos y sus diversas aplicaciones son características de los usuarios que interactúan con sus dispositivos de forma continua mientras que la cobertura se limita a los usuarios que requieren tener bajos niveles en velocidades de datos por lo que su servicio se limita a las llamadas de voz y a ciertos aplicativos que no requieran altas velocidades. En este enfoque se ha observado que las zonas urbanas trabajan con las tecnologías UTMS, HSPA Y HSPA+ ya que permiten ofrecer velocidades de transferencia de datos de 21 Mbps de subida y 11 Mbps de bajada mientras que las redes desplegadas a nivel rural pertenecen a la tecnología CDMA2000 1X y CDMA2000 1X EV-DO (Abu-Rgheff, 2007) poseen tasas de transferencia de datos que van desde los 153 kbps hasta un máximo de 3,1 Mbps. Todas estas velocidades son teóricas (Etemad, 2004).

Las frecuencias de operación de las redes móviles que actualmente operan en el Ecuador están en las bandas de 850 MHz y 1900 MHz para las redes de segunda generación GSM y la bandas para UTMS respectivas a cada operador (CONECEL – Claro UTMS 850 MHz, OTECEL – Movistar UTMS 850MHz, CNT UTMS 1900 MHz) (CONATEL, 2013). Dentro de las bandas de operación de la tecnología CDMA 2000 están las bandas de frecuencia de 1900 MHz para las tecnologías CDMA2000 1X y CDM2000 1X EV-DO por parte de CNT mientras que la banda de

450 MHz la ocupan las operadoras CNT y ETAPA en las tecnologías anteriormente mencionadas (SUPERTEL, 2013). Además de las bandas de UHF y VHF que son propias de la televisión análoga junto con la banda de frecuencias de la televisión digital ISDB-T cuyo rango va desde los 470 MHz hasta los 770 MHz.

El Gobierno Nacional mediante planes de recuperación de las zonas afectadas por las explotaciones de petróleo ha realizado propuestas y diseños de las denominadas “Comunidades del Milenio” mediante los recursos provenientes del 12% de las utilidades petroleras de la empresa estatal Petroamazonas. Estas comunidades contarán con vialidad fluvial, agua potable, alcantarillado, sistema de manejo de desechos sólidos, infraestructura portuaria, generación-distribución eléctrica, telefonía fija y móvil, saneamiento, transporte, comunicaciones y mercados. El actual gobierno prevé construir unas 200 comunidades dentro de las provincias de Sucumbíos y Orellana. Existen dos comunidades Pañacocha y Cuyabeno en las cuales ya comenzaron las obras a mediados del año 2011 y se espera que para mediados de 2013 hayan culminado las obras en dichos sitios (Ecuador Inmediato, 2011). Las tecnologías que actualmente existen dentro de estas zonas son las que otorgan los denominados “Infocentros Comunitarios” que utilizan la tecnología de enlaces satelitales *VSAT* (Very Small Aperture Terminal) (Gerard, 2004) cuyas velocidades de transmisión de datos actual son de hasta 256 kbit/s para la portadora desde la central a las estaciones remotas (salida – descendente – adelante), con modulación QPSK y de 38,4 Kbit/s para la portadora de las estaciones remotas a la central (entrante – hacia arriba – retorno) con una modulación MSK (CONATEL, 2012).



## **1.2. Justificación e Importancia**

Las redes de telecomunicaciones actuales que se encuentran disponibles en la mayoría de las zonas rurales de la Amazonía son los enlaces satelitales VSAT que es proporcionado a cada uno de los Infocentros Comunitarios. Su tasa de transmisión es muy baja para los requerimientos actuales. Las obras que se encuentran en pleno desarrollo están 80 casas disponibles para la comunidad, una escuela del milenio, un área destinada para las consultas médicas y un call center. Estos servicios requieren disponer de un alto ancho de banda sobre todo en los servicios destinados a la educación y a la salud (tele-medicina, tele-educación) debido a que las comunidades se encuentran bastante alejadas de la zona urbana de sus respectivas provincias. Las soluciones que actualmente dispone la Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT es las redes CDMA 450 MHz 1XEV-DO Rev. A otorgando un ancho de banda promedio de 600-1400 kbps en el enlace descendente y de 500-800 kbps en el enlace ascendente. En este caso se requeriría evolucionar las redes a una tecnología CDMA EV-DO Rev. B cuyas velocidades son similares a las proporcionadas por la tecnología 3.9 G que es LTE (CDG, 2013).

La disponibilidad del espectro se ha visto reducida debido a los múltiples servicios que requieren las bandas de frecuencia dentro de las telecomunicaciones (TV Digital, TV Análoga, Redes Celulares 2G y 3G) por lo que el hecho de trabajar con una banda de frecuencia de 450 MHz nos permite obtener un menor grado de interferencia con el resto de servicios junto con una mayor eficiencia y alcance dentro de la cobertura al trabajar con menores rangos de frecuencia en comparación a las tecnologías móviles anteriores y con menores anchos de banda en el espectro de frecuencias. Dentro de las múltiples ventajas que se puede obtener a comparación de las redes de tercera generación son: mayor cobertura, mayores velocidades de

transmisión, menor latencia, mayor rendimiento de la red, una arquitectura All IP (Ecuador Inmediato, 2011), entre otros.

A medida que va creciendo la tendencia del uso de los dispositivos móviles esta se va expandiendo a las zonas rurales sobre todo en aquellos sitios donde no es factible desarrollar las infraestructuras de las zonas urbanas referentes a las transmisiones de voz y datos (tendido de cobre, fibra óptica, etc.) debido a la complejidad de su perfil geográfico y fluvial dentro de estas zonas. Como en toda red de telecomunicaciones se requiere la expansión y la escalabilidad de las mismas pensando en las futuras aplicaciones y las altas velocidades que se desea obtener. Es conveniente desarrollar una red que permita manejar altas tasas de datos y que tenga un desempeño igual o mayor referente a la cobertura para lo cual las redes LTE 700 MHz se presentan como una opción a corto plazo. El Consejo Nacional de Telecomunicaciones (Conatel) resolvió otorgar al operador estatal CNT la autorización para ofrecer servicios 4G con la tecnología LTE. El organismo además le concedió a la empresa 30 MHz de espectro en la banda de 700 MHz para las zonas rurales.

La universalización de la Banda Ancha es uno de los retos tecnológicos que tiene como objetivo nuestro país ya que de esa forma se masifica la oferta de banda ancha a todos los sectores del Ecuador. La búsqueda de la Sociedad de la Información contempla planes que fomenten el desarrollo de los sectores rurales en cuanto al acceso a la educación, la universalización de la enseñanza primaria, la creación de contenidos en lenguas nativas de cada región o nacionalidad, la inclusión de los sectores rurales dentro del comercio electrónico a la vez que se deben generar políticas que logren un beneficio equitativo para todos los participantes tanto en el lado de la oferta como en la demanda.

Las dos tecnologías CDMA 450 MHz EV-DO Rev. B y LTE 700 MHz son las tecnologías que van a entrar en discusión para la incursión de las zonas rurales a las redes móviles de cuarta generación y a la universalización de la banda ancha en estos sectores. La importancia de este estudio conlleva en analizar y demostrar cuales de estas dos tecnologías tienen mejor desempeño, menor costo de implementación y si existiese la posibilidad de migrar o realizar la interoperabilidad de dichas redes ya que actualmente se encuentra disponible la red CDMA 450 MHz. Dentro de las ventajas que puede ofrecer la tecnología CDMA 450 MHz a diferencia de las actuales redes VSAT y de la fibra óptica es un menor costo e inversión de CAPEX y OPEX, mínimos daños de las zonas geográficas donde se aplica dicha tecnología, menor uso de estaciones base en la zonas y un menor uso de energía eléctrica de las estaciones base.

### **1.3. Alcance del proyecto**

Como parte fundamental y prioritaria dentro del desarrollo de la tesis propuesta se requiere realizar el diseño preliminar de las redes inalámbricas tanto en la tecnología CDMA 450 MHz como en LTE 700 MHz. Dentro del diseño se considerará la parte de la red de acceso sobre todo en los parámetros técnicos como la Cobertura, el Dimensionamiento de la Red y la Capacidad de la misma (Throughput, Eficiencia Espectral, Tráfico de la Red) (Manosalvas & Santamaría, 2012) (Aliaga, 2011).

Un aspecto técnico que no se ha considerado dentro del desarrollo de las redes CDMA como LTE es su desempeño y para lo cual existen indicadores (*KPI Key Performance Indicators*) (Abu-Rgheff, 2007) que nos permitirán verificar la velocidad real (*throughput*) de los usuarios a fin de poder realizar las comparativas

de las dos redes que a su vez determinarán cuál de las dos redes resulta ser la más efectiva y práctica para su despliegue a nivel nacional.

La parte trascendental dentro del estudio de las tesis es la Interoperabilidad y Migración de la red CDMA 450 MHz hacia una red LTE. Mediante la investigación y el análisis en cuanto a la arquitectura de red y a la interfaz de radio de ambas tecnologías podemos determinar cuán factible resulta cambiar de tecnologías celulares además de tener en cuenta el factor económico debido a los costos que puede requerir realizar dicha transición.

Otro aspecto importante dentro del despliegue de una infraestructura de telecomunicaciones es el factor económico y para lo cual se requerirá realizar una investigación referente al Análisis de Mercado de las redes en desarrollo LTE 700 MHz tanto en el aspecto de infraestructura (materiales, costos de equipos, etc.) como en el aspecto social y de población a fin de cubrir las necesidades de los pueblos rurales en cuanto a las telecomunicaciones.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Realizar el estudio pertinente al diseño de las redes inalámbricas a nivel rural con el objetivo de determinar el desempeño de dichas redes mediante parámetros técnicos dentro de la interfaz de radio, la interoperabilidad y la posible migración de las redes celulares hacia la cuarta generación y el costo que tendría el despliegue de las mismas.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Desarrollar el diseño de cobertura de las redes CDMA y LTE a fin de poder abarcar las señales de voz y datos a las Comunidades del milenio y a sus alrededores. (Abu-Rgheff, 2007).
- Analizar los parámetros de desempeño de las redes celulares tanto en CDMA como en LTE.
- Determinar los parámetros técnicos necesarios que permitan realizar la interoperabilidad y migración de las redes para su posterior evolución hacia las redes de cuarta generación.
- Analizar el mercado de las redes LTE 700 MHZ que se ofrece a nivel mundial a comparación de las redes CDMA 450 MHZ que actualmente están disponibles a lo largo del territorio ecuatoriano.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1. Evolución de las Redes Celulares

La primera comunicación de radio inalámbrica fue realizada a finales del siglo XIX, es decir, a finales de la década de 1890 cuando Guglielmo Marconi demostró la primera telegrafía inalámbrica a la oficina de telégrafos de Inglaterra. A inicios de la década de 1900 Marconi pudo ejecutar correctamente la transmisión de señales de radio a través del Océano Atlántico desde el poblado de Poldhu en Cornwall, Inglaterra hasta la estación receptora ubicada en Newfoundland, Inglaterra. De esta forma Marconi envió el primer mensaje de radio trasatlántico por lo que dio origen a las comunicaciones inalámbricas (Zaki, 2012).

Se puede decir que dentro de las telecomunicaciones móviles a nivel terrestre tuvieron sus inicios en el año de 1947 con el desarrollo del concepto de *células* o *celdas* que fue realizado en los Laboratorios Bell de los Estados Unidos. El uso de células permite generar redes de comunicaciones móviles a su vez que permite un incremento sustancial de su área de cobertura. Todo esto concepto se lo realiza al dividir el área de cobertura en pequeñas celdas y cada una de estas celdas contará con su propia estación base. Estas estaciones operaron con diferentes frecuencias. Estos sistemas solo se utilizaron dentro del territorio del país norteamericano siendo utilizado por un grupo muy pequeño de usuarios que además del factor económico ya

que estos equipos representaban un costo muy alto solamente podían ser utilizados en los automóviles.

Los primeros sistemas de comunicaciones móviles que tuvieron un crecimiento a gran escala de parte de los usuarios llegaron en la década de 1980 y llegaron a ser conocidos como los sistemas móviles de primera generación o 1G.

### **AMPS**

AMPS (Advanced Mobile Phone System) fue el estándar Norteamericano y opero en la banda de 800 MHz. El sistema AMPS fue también implementado en Asia, Rusia y Sudamérica. Este fue un sistema análogo que utilizo la transmisión FM (Frecuencia Modulada) en las bandas de frecuencia de 824 – 849 MHz y 869 – 894 MHz. En sus especificaciones técnicas tuvo una separación entre canales de radio de 30 kHz y un total de 832 canales de radio con un usuario por canal de radio.

### **TACS**

TACS (Total Access Cellular System) fue un sistema derivado de la tecnología AMPS. El sistema TACS fue implementado en la banda de 800 – 900 MHz. La primera red AMPS fue ejecutada en el Reino Unido, por lo que se extendió esta tecnología otros países Europeos y al continente Asiático como China, Singapur, Hong Kong, Japón y el Medio Oriente.

### **NMT**

NMT (Nordic Mobile Telephone) fue un sistema creado por las autoridades de telecomunicaciones escandinavas. Este sistema tuvo dos variantes: NMT – 450 que opero en la banda de frecuencias de 450 MHz y NMT – 900 que opero en la banda

de frecuencias de 900 MHz. Esta red fue utilizada en los países nórdicos de Europa como Suecia, Noruega y Dinamarca. Además se extendió a otros países como Suiza, Holanda, Hungría, Eslovenia, Croacia, Bosnia, los países bálticos, y Rusia; pero también en Oriente Medio y Asia.

### **J-TACS**

J-TACS o JTAC (Japanese Total Access Cellular System) fue una variante del sistema AMPS que fue desarrollado e implementado en Japón. Este sistema trabajó en las bandas de frecuencia de 915 – 925 MHz y 860 – 870 MHz. Su separación entre canales de radio estaba entre los 12.5 o 25 KHz y tuvo un total de 800 canales de radio. Este sistema fue muy eficiente y económico para los países con un alto índice poblacional. Fue utilizado en Japón y Hong Kong (Sesia & Toufik, 2009).

#### **2.1.1. Evolución de las Redes CDMA**

Cuando se empezaron a desplegar las redes móviles en el mundo la idea principal del proceso de la evolución de dichas redes era ofrecer mayor movilidad a los usuarios, permitiéndoles moverse libremente a través de la zona de servicio de la red. Sin embargo, con la necesidad de aumentar la capacidad de las redes, las nuevas tecnologías surgieron a partir de la segunda generación (2G) de sistemas celulares. Los sistemas de este grupo son los sistemas digitales, utilizando tecnologías de transmisión diferentes, tales como CDMA (Acceso Múltiple por División de Código) y de TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo) en América del Norte, y GSM en Europa. A pesar de que los sistemas 2G están considerados para la transmisión de datos de baja velocidad era necesario enfocarse en gran medida a los sistemas de voz.



En septiembre de 1988, la CTIA (Cellular Telecommunications and Internet Association) dio a conocer los Requisitos de Desempeño del Usuario (UPR), que especifica los requisitos operacionales celulares para la segunda generación de sistemas celulares (2G) utilizando la tecnología digital. Los principales requisitos que figuran son los siguientes:

- Facilidad en la transición hacia nuevos sistemas
- El uso de terminales móviles en modo dual; es decir, los terminales son capaces de funcionar simultáneamente en sistemas analógicos y digitales.
- Compatibilidad con el espectro de frecuencias del sistema analógico existente.
- Costos razonables a nivel de Infraestructura y terminales móviles.

La Asociación de Industrias de Telecomunicaciones (TIA) creó comités con el objetivo de satisfacer los requerimientos que solicitaba la CTIA. Estos comités se presentan en la Tabla 1.

En Julio de 1993 fue publicado el primer estándar provisional CDMA IS-95. El estándar se basa en las especificaciones del sub-comité TR 45.5. IS-95 y define los requisitos de compatibilidad de los sistemas CDMA y AMPS en la banda de 800 MHz.

### **IS-95A**

El estándar CDMA IS-95A fue publicado en el año de 1995. Las características operativas del sistema descrito son las siguientes:

- Ancho de Banda del Canal de 1,25 MHz

- Tasa de Chip de 1,2288 Mcps (chips por segundo)
- Control de Potencia
- Procesamiento de Llamadas y Handoffs.

### Tabla 1.

#### Sub-Comités creados por la TIA

TR 45.3 (Sub-Comité de los Sistemas Celulares Digitales)	TR 45.5 (Sub-Comité de la Tecnología Digital de Espectro Ensanchado de Banda Ancha)
Este sub-comité fue presentado en 1989. El estándar TIA/EIA/IS-54 (especificación de compatibilidad del equipamiento de la red para el suscriptor en modo dual) adopto la tecnología TDMA como el esquema de acceso de la interfaz aérea para el canal de comunicación	Este sub-comité fue presentado en 1993. El estándar TIA/EIA/IS-95 (Estándar de Compatibilidad de la Estación Base – Estación Móvil para el Sistema de Espectro Ensanchado de Banda Ancha en Modo Dual) fue el punto de base inicial para el trabajo de las redes celulares CDMA.

**Fuente:** (Korowajczuk, De Souza, & Moreira, 2004)

#### IS-95B

En ese mismo año, dos documentos que son el ANSI-J-STD-008 y el TSB-74 fueron publicados, los cuales definían los estándares de compatibilidad y la interacción entre los sistemas CDMA y los Sistemas de Comunicación Personal (PCS) en las bandas de frecuencias de 1800 – 2000 MHz y especificaron una tasa de transferencia de datos de conmutación de circuitos opcional de 14.4 kbps. Al juntar estos dos documentos con las especificaciones del estándar IS-95A dieron origen al estándar IS-95B también conocido como TIA/EIA-95. Algunas de las características del estándar son:

- Compatibilidad con el estándar IS-95A

- Transmisión de Datos mediante la conmutación de paquetes.
- La velocidad del canal de tráfico se incrementó a 115.2 kbps mediante la combinación de los códigos de Walsh (significa el establecimiento de algunos canales de tráfico para el mismo usuario) (Korowajczuk, De Souza, & Moreira, 2004).

El estándar IS-95A/B que acogió a estos dos estándares junto con algunas de sus normas de señalización formaron la base de la tecnología celular 2G conocida como *cdmaOne*.

### **CDMA2000 1xRTT**

El término 1X es una abreviatura de 1xRTT (1x Tecnología de Transmisión de Radio). Dentro de esta terminología se creó un nuevo sistema el cual fue una versión preliminar de los estándares CDMA2000 conocido también como IS2000 Release 0. Dentro de esta versión se incluyen ciertas mejoras respecto a la velocidad de voz y datos llegando a ofrecer tasas de transferencia de 153.6 kbps o 307.2 kbps dependiendo de la configuración de radio. La primera versión completa de los estándares CDMA2000 fue el Release A, el cual fue publicado en el año 2000, la cual incluía una versión de multiportadora de banda estrecha (1X que significa el número de radio portadoras de 1.25 MHz) y de banda ancha (3X que significa 3 radio portadoras de 1.25 MHz = 3.75 MHz). Al añadir tres portadoras se tenía un incremento en la transferencia de datos e incluso de la tasa de chips ya que se incrementaba su valor a 3.6864 Mcps (chips por segundo). Esta tecnología no era considerada como una red móvil de tercera generación 3G por sus bajas velocidades pero la ITU en el año de 1999 la acreditó como una tecnología 3G.

### **CDMA2000 1xEV-DO**

A pesar del éxito que disponía las redes CDMA2000 1xRTT las operadoras móviles querían disponer de una red que introduzca tasas de alta velocidad de datos. Es así que se introdujo la tecnología de radio basada en la interfaz aérea para Tasas de Datos de Alta Velocidad optimizada en paquetes de datos (HDR) la cual fue desarrollada por la empresa Qualcomm. A inicios del año 2000 se realizan mejoras en la tecnología HDR la cual permitieron la creación de un nuevo estándar denominado HRPD (High-Rate Packet Data). A este estándar se le conoce también como IS-856 o 1xEV-DO (Evolution – Data Optimized). Vale recalcar que esta tecnología no es compatible con su versión anterior, es decir la tecnología CDMA2000 1xRTT (Etemad, 2004).

CDMA2000 1xEV-DO Release 0 (Rel. 0) (TIA-856-IS856) está diseñado y optimizado para ofrecer los servicios de red de banda ancha centrados en la transferencia de datos. Puede soportar velocidades de datos en banda ancha en downlink hasta 2.4 Mbps en un canal de radio de 1.25 MHz. Comercialmente lanzado en 2002, fue la primera tecnología de banda ancha móvil que se desplegó en todo el mundo.

### **CDMA2000 1xEV-DO Revision A**

CDMA2000 1xEV-DO Revisión A (Rev. A) (TIA-856-A) es una evolución de la versión CDMA2000 1xEV-DO Rel. 0 la cual dispone de un aumento en la velocidad de datos máxima de los enlaces reversos (reverse link) y en los enlaces directos (forward link). También incorpora la tecnología de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) que permite disponer de servicios de difusión

multimedia y de multidifusión (MBMS). La tecnología CDMA2000 1xEV-DO Rev. A fue lanzado a nivel comercial en octubre de 2006.

### **CDMA Multicarrier EV-DO y CDMA2000 1xEV-DO Revision B**

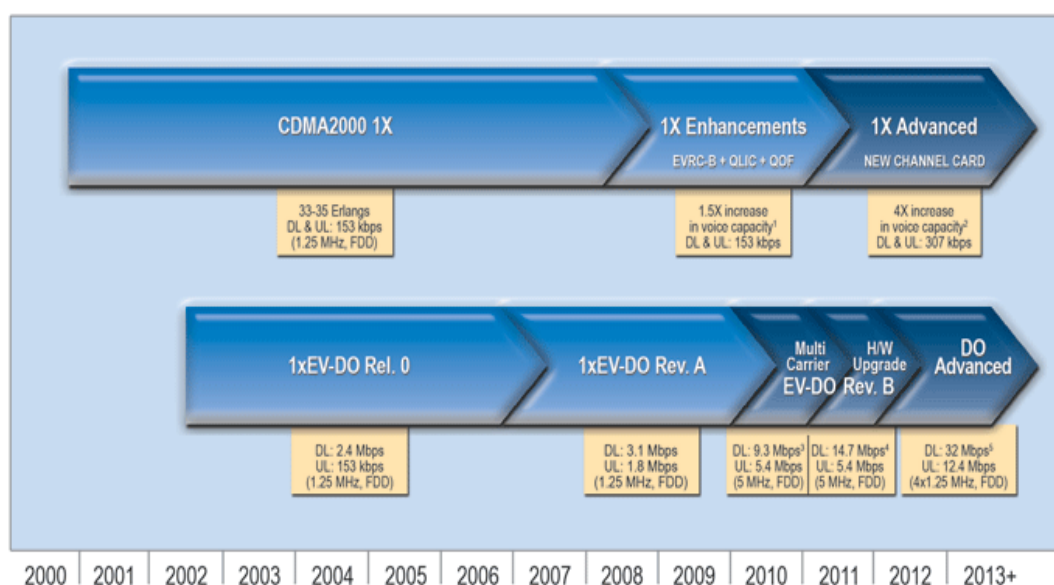
CDMA Multicarrier EV-DO y CDMA2000 1xEV-DO Revision B son dos tecnologías que representan la evolución de la Rev. A ya que realizan mejoras en lo que se refiere a las velocidades de banda ancha al aumentar la capacidad de la red a través de actualizaciones a nivel de software y hardware, respectivamente. La tecnología CDMA Multicarrier EV-DO se basa en la incorporación de múltiples portadoras de radio de 1.25 MHz de la Rev. A la cual realiza estos procesos dentro del software de los equipos lo cual permite un mayor flujo de datos tanto en los enlaces ascendentes (uplink) y descendentes (downlink). Mientras que la tecnología CDMA2000 1xEV-DO Revision B añade una nueva tarjeta en el canal de radio lo cual aumenta las velocidades de transferencia de datos de hasta 14.7 Mbps en el enlace descendente dentro de una portadora de radio de 5 MHz y aumenta la capacidad del enlace ascendente de hasta un 65% con respecto a su tecnología anterior mediante técnicas como la cancelación de interferencias. La tecnología CDMA Multicarrier EV-DO tuvo su lanzamiento comercial en Enero de 2010.

### **DO Advanced**

La tecnología DO Advanced está compuesta por una variedad de características que pueden ser introducidas en una red EV-DO Revisión A (Rev. A), Multicarrier EV-DO o la red EV-DO Rev. B. DO Advanced aprovecha dos características básicas de tráfico de datos móviles en la cual el tráfico que circula a través de la red de un operador nunca se distribuye de manera uniforme en el espacio y el tiempo, y que muchas de las sesiones de datos son relativamente de corta duración. En lugar de

añadir capacidad a través de una red completa, DO Advanced permite que un operador asigne de manera dinámica la capacidad de red existente donde y cuando más se necesita.

Finalmente podemos apreciar en la Figura 1 el paso evolutivo de las redes CDMA2000 a lo largo de los últimos años.



**Figura 1. Evolución de las redes CDMA2000**

**Fuente:** (CDG, 2013).

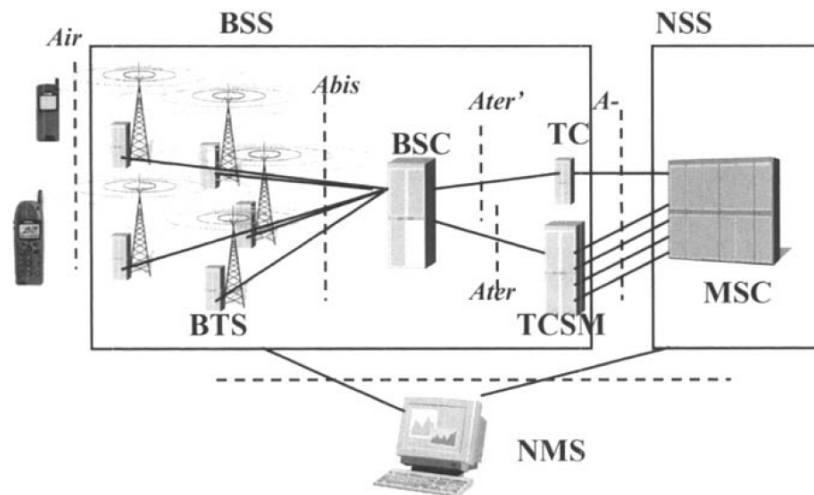
### 2.1.2. Evolución de las redes GSM, UTMS y LTE

A mediados de la década de 1980 la Comisión Europea inició una serie de actividades para liberar el sector de las comunicaciones, incluidas las comunicaciones móviles. Esto dio lugar a la creación de ETSI (European

Telecommunications Standards Institute), que heredó todas las actividades de estandarización sobre las normas y leyes de telecomunicaciones en el territorio Europeo. Esta organización realizó múltiples evaluaciones con las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA para que finalmente quede establecida la tecnología TDMA como una de las primeras especificaciones para las redes móviles digitales. De esa manera se desarrolló el estándar GSM (Global System for Mobile Communications) que fue uno de los primeros estándares de las redes móviles de segunda generación (2G). Desde su lanzamiento comercial a inicios del año de 1991, GSM ha evolucionado gradualmente para satisfacer las necesidades del tráfico de datos y muchos más servicios que las redes análogas.

### **GSM**

Los principales elementos de este sistema son el BSS (Subsistema de la Estación Base), dentro de la cual se encuentran la BTS (Transreceptor de la Estación Base) y la BSC (Controlador de la Estación Base); y el NSS (Subsistema de los Conmutadores de Red), en la que se encuentra el MSC (Centro de Conmutación Móvil); VLR (Registro de Localización de Visitantes); HLR (Registro de Ubicación Base); AC (Centro de Autenticación) y el EIR (Registro de Identificación de Equipos) como podemos apreciarlos en la Figura 2. Esta red es capaz de proporcionar todos los servicios básicos, tales como los servicios de voz y datos de hasta 9.6 kbps, fax, etc. Esta red también cuenta con una extensión de las redes de telefonía fija.



**Figura 2. Arquitectura del Sistema GSM**

**Fuente:** (Mishra, 2004)

### **GSM y VAS (Valued Added Services)**

El siguiente avance en el sistema GSM fue la adición de dos plataformas, llamado el Sistema de Correo de Voz (VMS) y el Centro de Servicio de Mensajes Cortos (SMSC). El SMSC logro demostrar un enorme éxito comercial, tanto es así que en algunas redes del tráfico de SMS constituyen una parte importante del tráfico total. Junto con la VAS, los Servicios Inteligentes IN (Intelligent Services) también dejaron su huella en el sistema GSM, con su ventaja de dar a los operadores la oportunidad de crear toda una gama de nuevos servicios como la gestión de fraude y los servicios prepago.

### **GPRS (General Packet Radio Services)**

Como requisito para el envío de datos sobre la interfaz aérea se añadieron nuevos elementos tales como el SGSN (Serving GPRS) y el GGSN (Gateway GPRS) dentro



del sistema GSM. Estos elementos hacen posible el envío de paquetes de datos en la interfaz aérea. Esta modificación realizada en la red del paquete de datos también se la conoce como la red central de paquetes o *packet core network*. Además del SGSN y GGSN, también se añadieron otros dispositivos de red como los routers IP, servidores de firewall y los DNS (Servidores de nombres de dominio). Estos elementos permiten el acceso inalámbrico a Internet y la velocidad de bits se incrementó hasta un máximo de 150 kbps en condiciones óptimas. Estas tecnologías dieron el inicio a la generación de redes móviles 2.5G.

#### **EDGE (Enhanced Data rates in GSM Environment)**

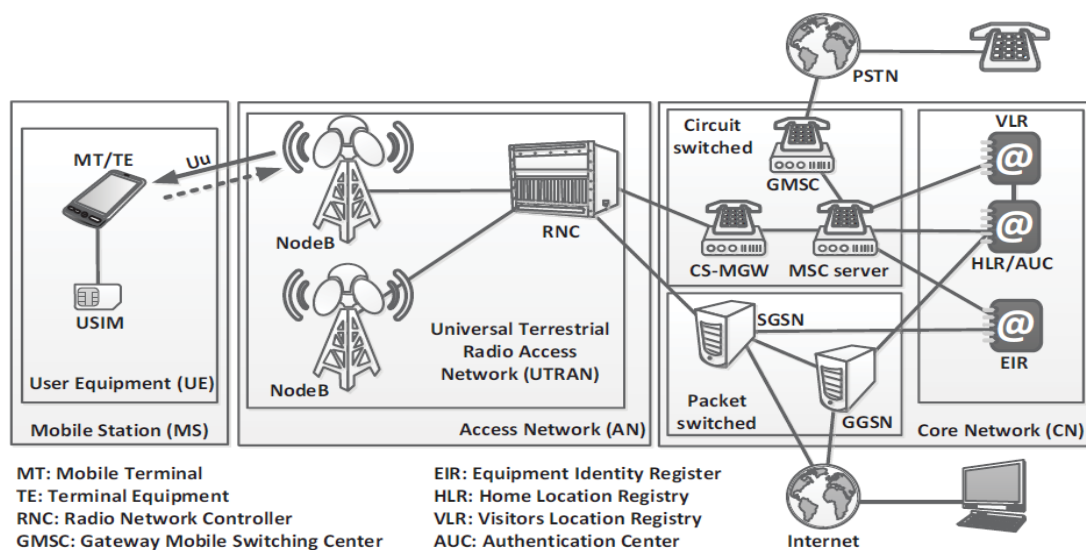
Luego del incremento de las actividades tanto en el servicio de voz como datos las operadoras móviles sintieron la necesidad de incrementar la velocidad de transferencia de datos. Esto se realizó mediante el uso de métodos de modulación más sofisticadas a través de Internet (el esquema de modulación en GSM era GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) y paso a tener la modulación 8PSK) y por lo tanto el aumento de la velocidad de datos llegó hasta los 384 kbps (Mishra, 2004).

#### **UTMS (Universal Mobile Telecommunication System)**

La primera versión de los estándares UTMS se finalizó a fines de la década de 1990, es por eso que la tecnología UMTS se la conoce también como *Release 99* o *R99* que fue desarrollado por la organización 3GPP (Proyecto de Asociación de Tercera Generación). La principal motivación para la creación del estándar UTMS fue definir un estándar de comunicación móvil universal que apunta a mayores tasas de transferencia de datos, con la capacidad de adaptarse de forma dinámica las velocidades de datos del usuario. UMTS utiliza la tecnología de Acceso múltiple por división de código de banda ancha (WCDMA), que es un nuevo esquema de acceso

múltiple en comparación con la utilizada en el GSM. También utiliza un mayor ancho de banda de 5 MHz para cada uno de los enlaces descendente y ascendente.

La arquitectura UTMS es muy similar al de GSM con algunas modificaciones. La Red de Acceso Radio en UTMS se denomina UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) y consiste de un Controlador de la Red Radio (RNC) y algunas NodeBs (que representan a las Estaciones Base UTMS). La red UMTS es compatible con las conexiones por conmutación de circuitos y por conmutación de paquetes. Las conexiones por conmutación de circuitos se utilizan para transportar los servicios de voz, mientras que las conexiones por conmutación de paquetes se utilizan para los servicios de datos. En la Figura 3 podemos observar la arquitectura del sistema UTMS.



**Figura 3. Arquitectura de la red UTMS**

**Fuente:** (Zaki, 2012)

### **HSDPA (High Speed Downlink Packet Access)**

Es la quinta versión de las especificaciones UMTS. Los objetivos que se propusieron en esta versión fueron mejorar las tasas de transferencia de datos del enlace descendente del estándar UMTS hasta llegar a los 14 Mbps en condiciones óptimas, aumentar la eficiencia espectral, así como reducir la latencia del sistema. Esto se logra mediante la introducción de varias funciones nuevas:

- *Modulación y Codificación Adaptativas (AMC):* Los esquemas de modulación y codificación de la transmisión del usuario cambian de forma adaptativa en función de las condiciones del canal del usuario.
- *Intervalo de Tiempo de Transmisión (TTI) más corto:* la longitud del TTI se reduce en HSDPA a 2 ms, en lugar de 10 ms que se disponía en el R99. TTI es la duración de una transmisión por el enlace de radio.
- *Uso del Modelo Híbrido de Solicitud de Respuesta Automática (HARQ):* Realiza retransmisiones de los paquetes erróneos entre el Nodo B (Estación Base) y el UE (Equipo del Usuario) en lugar de esperar a las retransmisiones de las capas superiores. Por tal motivo, esto se traducirá en la reducción de la latencia.

### **HSUPA (High Speed Uplink Packet Access)**

HSUPA tuvo como objetivos principales mejorar el rendimiento del enlace ascendente de la versión UMTS R99 para incrementar las velocidades de datos del usuario de hasta 5,76 Mbps y reducir la latencia. HSUPA también utiliza conceptos similares a HSDPA: TTI corto de 2ms y HARQ. Sin embargo, la AMC no se utiliza en HSUPA, ya que no soporta ningún esquema de modulación de alto orden ya que sólo utiliza la modulación QPSK. Esto se debe a que los esquemas de modulación

más altos requieren más energía por bit que provoca una mayor disminución del consumo de energía en el equipo del usuario.

El uso de ambas mejoras (es decir, HSDPA y HSUPA) se refiere a menudo como *HSPA (High Speed Packet Access)*. Los operadores de redes móviles desplegaron las redes HSPA en coexistencia con las redes UMTS R99 (Zaki, 2012).

### **HSPA+ (Evolved HSPA)**

Mientras que las tecnologías definidas en HSPA definían las bases para el acceso móvil de banda ancha, HSPA+ ha logrado incrementar la capacidad de las redes HSPA. HSPA+ ha tenido sus variaciones en las diversas versiones de los estándares 3GPP desde el *Release 7* hasta llegar al *Release 10*.

Los tasas de transferencia de datos de los enlaces descendente y ascendentes han mejorado con la tecnología de Doble Celda de HSPA (DC-HSPA), con un total de 3 y 4 portadoras HSPA (Multicarrier HSPA) y con modulaciones de alto nivel como el esquema 64QAM para el enlace descendente y el esquema de 16QAM para el enlace ascendente. La tecnología Multicarrier HSPA permitirá el pleno beneficio de ancho de banda entre 10 - 20MHz que es similar a LTE. La velocidad de datos de enlace descendente también se puede aumentar por una solución multiantena (MIMO, Multiple Input Multiple Output). La velocidad de bits en el Release 9 es de 84 Mbps del enlace descendente y de 23 Mbps del enlace ascendente.

Otro factor fundamental del desarrollo y evolución de las redes HSPA+ es su baja latencia de extremo a extremo (end-to-end). La latencia de las redes HSPA+ ha llegado a tener un tiempo de 30 ms, el cual representa un gran avance con respecto a las redes UMTS WCDMA que disponían de una latencia de 200 ms. Otras ventajas

que podemos mencionar están la distribución del tráfico de voz mediante paquetes conmutados y la disminución del consumo de energía en los dispositivos móviles mediante el uso de la Transmisión y Recepción Discontinua (DTX/DRX).

En resumen, podemos afirmar que la capacidad de la red ha tenido un incremento notable desde las redes con R99 hasta llegar al Release 10 con HSPA+. Todo esto ha sido posible mediante la conmutación de paquetes y su flujo de tráfico ya que anteriormente se limitaba solamente al servicio de datos pero se puede extender al servicio de voz (Holma & Toskala, 2010).

## **LTE**

LTE (Long Term Evolution) es una de las versiones más recientes de las especificaciones 3GPP. También se la conoce como red móvil 3.9G o Release 8. La organización 3GPP comenzó a trabajar en la tecnología LTE en Noviembre de 2004. La tarea principal fue estandarizar un sistema con nuevos objetivos de diseño que puedan superar los estándares móviles más antiguos (como el UMTS y HSPA) (Zaki, 2012).

La tecnología LTE es capaz de ofrecer una serie de ventajas sobre otras tecnologías inalámbricas. Estas ventajas incluyen atributos que incrementan el desempeño de la red, como las altas tasas máximas de datos y baja latencia y una mayor eficiencia en el uso del espectro inalámbrico. Otras características importantes son:

- Alta eficiencia espectral
- Latencia muy baja
- Capaz de soportar múltiples velocidades de banda ancha móvil

- Arquitectura de Protocolos Simple
- Compatibilidad con otros sistema, por ejemplo, las redes cdma2000.
- Las duplexaciones FDD y TDD dentro de una tecnología de acceso radio.
- Multicast/Broadcast Eficiente

Las especificaciones que ha desarrollado la 3GPP han tenido su evolución en las redes GSM, UTMS y LTE. Todas estas versiones han definido de manera muy estable sus características. En la Tabla 2 se puede apreciar las versiones lanzadas por la 3GPP desde las redes UTMS hasta llegar a las redes LTE.

**Tabla 2.**

**Especificaciones de la 3GPP desde las redes UTMS hasta LTE**

<i>Versión (Release)</i>	<i>Fecha de Lanzamiento</i>	<i>Características</i>
<b>R99</b>	Marzo del 2000	Interfaz Aérea WCDMA
<b>R4</b>	Marzo del 2001	Interfaz Aérea TD-SCDMA
<b>R5</b>	Junio de 2002	HSDPA, Subsistema Multimedia IP
<b>R6</b>	Marzo de 2005	HSUPA
<b>R7</b>	Diciembre de 2007	Mejoras a la tecnología HSPA
<b>R8</b>	Diciembre de 2008	LTE, SAE
<b>R9</b>	Diciembre de 2009	Mejoras a LTE, SAE
<b>R10</b>	Marzo de 2011	LTE-Advanced
<b>R11</b>	Septiembre de 2012	Mejoras a LTE-Advanced

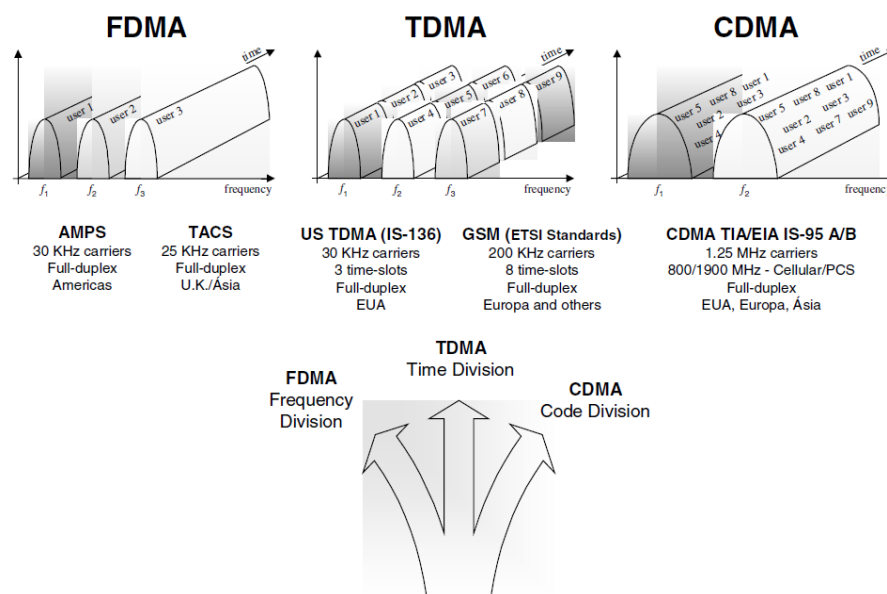
**Fuente:** (Cox, 2012).

## **2.2. Sistemas Celulares CDMA**

### **2.2.1. Definición**

Debido a la cantidad limitada de espectro radioeléctrico asignado para los sistemas inalámbricos, la industria de las telecomunicaciones ha desarrollado

múltiples técnicas de acceso para permitir que varios usuarios puedan compartir los canales de comunicación disponibles de manera eficiente. En la Figura 4 podemos observar las técnicas de acceso múltiple más comunes.



**Figura 4. Técnicas de Acceso Múltiple**

**Fuente:** (Korowajczuk, De Souza, & Moreira, 2004).

- **Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA):** Asigna un discreto porcentaje de ancho de banda para cada usuario.
- **Acceso Múltiple por División de Tiempo (FDMA):** Asigna ranuras de tiempo para cada usuario, es decir, cada usuario tiene un conjunto específico de intervalos de tiempo para transmitir información (datos / voz).
- **Acceso Múltiple por División de Código (CDMA):** Todos los usuarios comparten la misma frecuencia todo el tiempo. Un código asignado a cada usuario le permite ser distinguido de otros usuarios.

CDMA fue creado para proporcionar comunicaciones seguras y sistemas de navegación para aplicaciones militares, promoviendo así el desarrollo de la tecnología de espectro ensanchado (SS), cuyos objetivos principales incluyen lo siguiente:

- Acceso Múltiple sobre una frecuencia portadora
- Reducción de la Interferencia
  - *Múltiples Rutas:* La reducción de los efectos no deseados de versiones retardadas de la misma señal que llegan al receptor a través de diferentes caminos, causando así la auto-interferencia y la interferencia mutua
  - *Intra-Sistema:* La minimización de la interferencia provocada por una estación base diferente o terminal móvil que pertenece al mismo sistema.
  - *Externo:* La reducción de las perturbaciones de funcionamiento de la red causadas por agentes externos.
- Privacidad
  - *Entre los Usuarios:* La información transmitida en la red sólo puede ser entendida por el destinatario.
  - *Intercepción:* Los receptores no autorizados no puede interceptar las señales ni la información transmitida/recibida en la red.

### **Sistemas CDMA2000**

Los sistemas CDMA basados en los estándares CDMA2000 son capaces de utilizar distintas configuraciones de portadoras, empleando portadoras con anchos de banda de 1.25 MHz y 3.75 MHz (Korowajczuk, De Souza, & Moreira, 2004).



Estos sistemas representan una familia de las IMT-2000 (Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000) dentro de las redes tercera generación 3G que prestan servicios de datos de banda ancha de voz de alta calidad. CDMA2000 se basa en las ventajas inherentes de las tecnologías CDMA e introduce otras mejoras como la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM), el control avanzado y los mecanismos de señalización, la mejora de las técnicas de gestión de interferencias, calidad de servicio (QoS) de extremo a extremo, y las nuevas técnicas en las antenas tales como MIMO (Multiple Input Multiple Output) y la formación de haz (beamforming) para aumentar las tasas de transmisión de datos y la calidad del servicio, al tiempo que mejora significativamente la capacidad de la red.

### **Sistema CDMA2000 1X**

CDMA2000 1X (IS-2000) es una tecnología IMT-2000 (3G) diseñada para ofrecer servicios de voz de alta calidad y datos de alta velocidad. Se trata de una tecnología inalámbrica eficiente para comunicaciones de voz mediante la conmutación de circuitos y es compatible con las velocidades de paquetes de datos de hasta 153,6 kbps en un solo canal de radio de 1,25 MHz.

CDMA2000 1X fue la primera tecnología 3G (IMT-2000) desplegada en octubre de 2000.

Las principales características de CDMA2000 1X:

- **Capacidad de voz:** En la actualidad CDMA2000 1X soporta entre 33 – 40 llamadas de voz simultáneas por sector en una sola portadora de 1.25 MHz FDD. Utiliza un nuevo códec de voz (EVRC-B), códigos de Walsh

adicionales y realiza la cancelación de la interferencia en las llamadas de voz. Esto le permite manejar hasta 55 llamadas de voz simultáneas.

- **Datos de alta velocidad:** Soporta velocidades de datos máxima en ambas direcciones (enlaces ascendente y descendente) de hasta 153,6 kbps, entregando un rendimiento promedio en su tasa de datos de 80 a 100 kbps en redes comerciales.
- **Eficiencia espectral:** Hasta 0.180 bit / s / MHz por un canal FDD de 5 MHz.
- **Latencia Promedio:** 250 ms de ping de extremo a extremo.
- **Compatibilidad con versiones anteriores:** CDMA2000 1X es compatible con las redes 2G cdmaOne (IS-95A / B).

#### **Sistemas CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0**

La tecnología CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0 es considerada la primera versión del estándar EV-DO. Dentro de las características clave que dispone esta tecnología están las siguientes:

- *Velocidad de Datos de Banda Ancha:* Puede soportar velocidades de hasta 2.4 Mbps en el enlace directo y de 153.6 kbps en el enlace reverso mediante un portadora de canal de radio de 1.25 MHz FDD (Duplexación por División de Frecuencia). Las velocidades promedio para esta tecnología que ofrecen las redes comerciales es de 300 – 700 kbps en el enlace directo y de 30 – 70 kbps en el enlace reverso.
- *Eficiencia Espectral:* Dispone de una eficiencia espectral de 0.630 bit/s/MHz y de 0.180 bit/s/MHz en los enlaces directo y reverso para un canal de radio FDD de 5 MHz.
- *Bajo Promedio de Latencia:* Dispone de una latencia menor a los 110 ms.

- *Tecnología All-IP*: Esta red opera dentro del Protocolo de Internet (IP) y con sus aplicaciones de software.
- *Compatibilidad con otras Redes*: Esta tecnología dispone de la compatibilidad con sus sistemas predecesores, es decir, con las tecnologías CDMA2000 1xRTT y los sistemas cdmaOne.
- *Aplicaciones*: Es compatible con las aplicaciones de datos de banda ancha.

### **Sistema CDMA 450**

CDMA 450 representa una familia de tecnologías CDMA2000 que operan en la banda de 410-470 MHz. La banda de 450 MHz incluye sub-bandas en la gama de frecuencias de 410-430 MHz, 450-470 MHz y 470-490 MHz.

Los Sistemas CDMA 450 soportan todos los estándares CDMA2000 que incluyen: CDMA2000 1X, 1xEV-DO Release 0, Revision A, y las futuras mejoras en estas tecnologías. Estas tecnologías son capaces de entregar voz, acceso a Internet, multicasting y servicios de datos de banda ancha, tanto en entornos rurales como urbanos utilizando fijo, movilidad limitada y redes de movilidad completos.

Una ventaja significativa de CDMA 450 es que puede proporcionar servicios de telecomunicaciones avanzadas sobre un área muy extensa debido a la mejora de las características de propagación permitido por la banda de baja frecuencia. Mediante la combinación de la gama ampliada de la banda de frecuencia de 450 MHz con los beneficios de CDMA 2000 tenemos la eficiencia espectral, la capacidad de voz, velocidades de datos de banda ancha, menor latencia y la calidad de servicios (QoS) (CDG, 2013).

Las ventajas que otorga el trabajar a la banda de frecuencia de 450 MHz es su amplia cobertura ya que se obtienen coberturas máximas a radios de celda aproximados de 50 Km. A continuación se presenta la Tabla 3 que muestra la comparativa de coberturas de la tecnología CDMA a distintas bandas de frecuencia.

**Tabla 3.**

**Tabla Comparativa de las Bandas de Frecuencia en CDMA y su Cobertura**

<i>Frecuencia (MHz)</i>	<i>Radio de la Celda (Km)</i>	<i>Área de la Celda (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Celdas necesarias para Coberturas Equivalentes</i>
<b>450</b>	48.9	7521	1
<b>850</b>	29.4	2712	2.8
<b>950</b>	26.9	2269	3.3
<b>1800</b>	14.0	618	12.2
<b>1900</b>	13.3	553	13.6
<b>2500</b>	10.0	312	24.1

**Fuente:** (Nedevschi, Surana, & Du, 2006)

### **2.2.2. Características y Tecnologías de CDMA**

#### **Espectro Ensanchado**

La idea básica de las comunicaciones del espectro ensanchado se basa en la transmisión de información a través de canales mucho más amplios que los exigidos por el ancho de banda de la señal original. El término de espectro ensanchado se utiliza para reflejar el hecho de que el sistema propaga la energía de la señal de información sobre un canal de banda mucho más amplio, lo que permite la transmisión de señales a densidades espectrales de potencia muy bajas.

Dos métodos del espectro ensanchado son usualmente utilizados en los sistemas de comunicaciones:

- *Ensanchamiento de Secuencia Directa*, el cual es utilizado en los sistemas CDMA 2G y 3G que involucra la modulación o multiplicación de cada bit de información por una secuencia de ensanchamiento de alta velocidad.
- *Salto de Frecuencia*, el cual se desarrolla en el estándar WiFi 802.11 y en otras tecnologías de acceso de radio inalámbrico de banda ancha que involucra el salto aleatorio de subportadoras de banda estrecha dentro de un amplio espectro.

### **Reuso Universal de Frecuencias**

En una red TDMA típica los canales de frecuencia deben ser cuidadosamente asignados a las células o sectores en un clúster (cantidad de canales que la banda de frecuencias requiere y se distribuye por varias celdas) de tal manera que el nivel de cocanal se mantiene por encima de la relación mínima de portadora / interferencia ( $C / I$ ) requerida por los esquemas de codificación y modulación del sistema. El requisito de la relación  $C / I$  limita la reutilización de canales en una red y reduce la disponibilidad de espectro eficaz por célula.

Una red CDMA puede tomar ventaja de la ganancia de procesamiento asociado con la despropagación para funcionar a una relación  $C / I$  muy baja. Con una gran ganancia de procesamiento la red puede ser diseñada para permitir la demodulación y la detección de señales a niveles muy por debajo de la interferencia cocanal.

Mediante este requerimiento de la relación  $C / I$  la cual debe ser muy baja, un sistema CDMA puede ser diseñado con un reuso de frecuencia de 1 o también

denominado reuso universal de frecuencias, lo que implica que la misma frecuencia portadora puede ser utilizada por cada célula o sector y por lo tanto todo el espectro puede ser utilizado en cada célula para maximizar la capacidad de la célula y la eficiencia espectral.

### **Soft Handoff**

El Handoff (handover o transferencia) en una red celular es una forma de diversidad macroespacial que permite que el terminal móvil se movilice sin problemas entre las células y mantenga su conexión con la estación base que tenga mayor señal. En las redes CDMA las celdas adyacentes pueden estar dando servicio con la misma frecuencia, por lo que se podría establecer una nueva conexión con una nueva celda adyacente antes de liberar la conexión antigua. A este procedimiento se le denomina *soft handover* ya que requiere menos potencia, lo que disminuye la interferencia y aumenta la capacidad del sistema.

Otra característica importante del soft handover es su técnica de macrodiversidad ya que en un intervalo de tiempo en el cual estamos recibiendo la señal de dos estaciones base, podemos combinar ambas señales en el receptor con el fin de mejorar nuestra señal demodulada.

### **Detección Multiusuario**

Se obtiene mediante la programación oportunista de usuario en el transmisor o el receptor. La programación de usuario oportunista se la define así: en un momento dado, el transmisor selecciona el mejor de usuario entre receptores candidatos de acuerdo a las cualidades de cada canal entre el transmisor y cada receptor. Un receptor debe alimentar de nuevo la información de calidad de canal al transmisor

utilizando niveles limitados de resolución, a fin de que el transmisor implemente la detección multiusuario.

### **Beamforming (Formación del Haz)**

Cualquier tecnología de red de acceso inalámbrico se beneficiaría de las técnicas de reducción de interferencia para mejorar el rendimiento de la capacidad y la cobertura. La formación del haz es una de estas técnicas que se basa en las redes o matriz de antenas y la diversidad espacial.

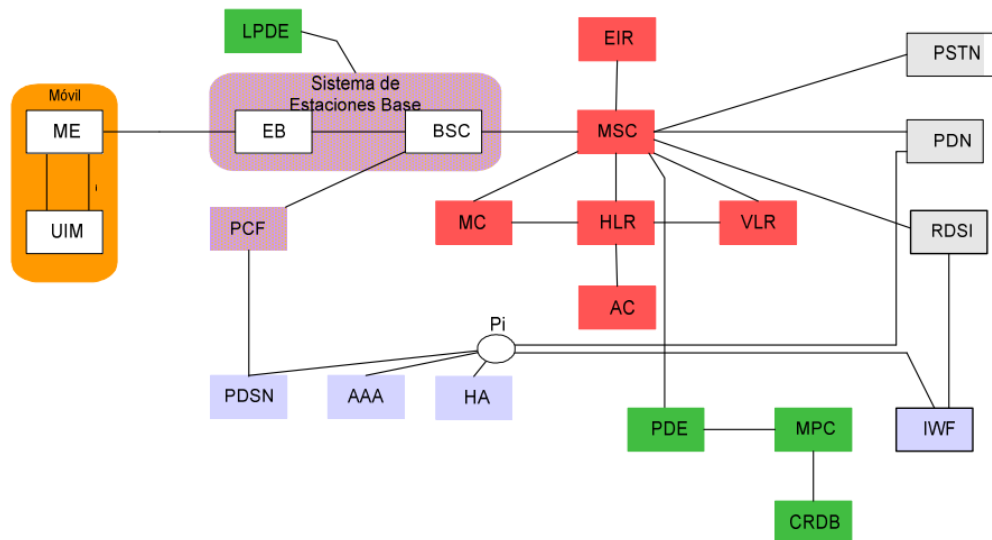
Una matriz de antenas consiste de varios elementos de antenas con su propio diagrama de radiación. La combinación de los elementos de antenas puede proporcionar un diagrama de radiación compuesto. El algoritmo del Beamforming estima el ángulo de llegada de las señales deseadas, así como interfiere y calcula el mejor conjunto de factores de ganancia complejos que forman el diagrama de antena deseada. (Etemad, 2004)

## **2.2.3. Arquitectura de Red**

### **2.2.3.1 CDMA2000**

La arquitectura referencial de las redes CDMA2000 se basan en las especificaciones de la organización 3GPP2 la cual corresponde a la especificación S.R0005-B que fue lanzado en el año de 1999 y tuvo una segunda revisión en el año 2007. El esquema de red se lo puede visualizar en la Figura 5.

Dentro de los componentes que dispone el presente esquema de red están los siguientes:



**Figura 5. Esquema de la Red CDMA2000**

**Fuente:** (Muñoz, 2006).

**Servidor AAA (Authentication, Authorization and Accounting):** Es una entidad que provee la funcionalidad al protocolo IP y realiza el soporte de las funciones de Autenticación, Autorización y Contabilidad.

**Centro de Autenticación AC (Authentication Center):** Gestiona la información de la autenticación relacionada al dispositivo móvil.

**CRDB (Coordinate Routing Data Base):** Es una entidad que almacena la información que permita traducir una determinada posición expresada en latitud y longitud a una cadena de dígitos.



**EIR (Equipment Identity Register):** El Registro de Identidad de Equipos registra la identidad del equipo del usuario. La naturaleza, el propósito y la utilización de esta información tienen fines de estudio de los dispositivos.

**HA (Home Agent):** Esta entidad de red realiza las siguientes funciones.

- Realiza la autenticación de los registros IP móviles desde el dispositivo móvil.
- Redirige los paquetes y los componentes de los agentes externos de la PSDN (Public Switched Data Network). Adicionalmente recibe y redirige los paquetes enviados desde los componentes agentes externos hacia el PSDN.
- Puede establecer, mantener y finalizar las comunicaciones seguras hacia el PSDN.
- Recibe la información de aprovisionamiento desde la AAA hacia los usuarios.
- Puede asignar una dirección IP doméstica y dinámica.

**HLR (Home Location Register):** Es el registro de localización en la cual una identidad de usuario se asigna con fin de tener un registro de la información del abonado (por ejemplo, Número Serial Electrónico (ESN), Número de Directorio Móvil (MDN), Información de Perfil, Ubicación Actual, Periodo de Autorización).

**IWF (Interworking Function):** La función de interconexión tiene la función de realizar la conversión de protocolos entre dos o más entidades de la red. Además puede aumentar una interfaz identificada y provee la conversión de servicios entre dos entidades de red.

**LPDE (Local Position Determining Entity):** La entidad local de determinación de posición facilita la ubicación o la localización geográfica de un terminal inalámbrico. Puede soportar una o más posiciones de diversas tecnologías.

**MC (Message Center):** El centro de mensajes es una entidad que almacena y renvía mensajes cortos. También permite proveer servicios suplementarios para el Servicio de Mensajes Cortos (SMS).

**ME (Mobile Equipment):** Es capaz de acceder a la red móvil para una configuración de servicios definida localmente. No dispone del módulo de identidad del usuario (UIM).

**MPC (Mobile Position Center):** El centro de posicionamiento de móviles selecciona una PDE (entidad de determinación de posición), el cual lo utiliza para determinar la ubicación de la estación móvil.

**Móvil:** El equipo móvil posee un UIM (módulo de la identidad de usuario) y puede contener información como el NAM (módulo de la asignación del número).

**MSC (Mobile Switching Center):** El centro de conmutación móvil tiene como función principal el de controlar el procesamiento y establecimiento de llamadas ya que se encarga del ruteo de llamadas para y desde un usuario móvil. Puede conectarse a otras redes públicas (PSTN, ISDN, etc.) y a otras MSCs ubicadas dentro de la misma red o en redes diferentes.

**PDN (Packet Data Network):** La red de paquete de datos provee el mecanismo de transporte de los paquetes de datos entre las entidades de procesamiento de la red las cuales son capaces de utilizar diversos servicios.

**PSDN (Packet Data Service Node):** El nodo servidor del paquete de datos enruta el tráfico de los paquetes de datos que transmiten y reciben los dispositivos móviles. Además establece, mantiene y finaliza las sesiones de la capa del enlace hacia los dispositivos móviles.

**PDE (Position Determining Entity):** La entidad de determinación de ubicación facilita la ubicación geográfica de un terminal inalámbrico. Realiza la misma función que el LPDE sólo que difiere en la ubicación que dispone el dispositivo dentro de la red ya que esta entidad tiene un alcance más global.

**UIM (User Identity Module):** El módulo de identidad del usuario contiene la información de la suscripción, como el NAM (módulo de asignación de número) y puede contener información sobre las características de la suscripción.

**VLR (Visitor Location Register):** Es una base de datos que contiene de manera temporal los datos de un usuario que no pertenecen a su red. Esto facilita el no consultar constantemente al HLR del usuario que se encuentra en roaming, El registro de visitantes es usado por el MSC para obtener información del manejo de llamadas desde y hacia un usuario visitante de la red.

**El punto de referencia  $P_i$ :** Este punto de referencia es la interfaz entre.

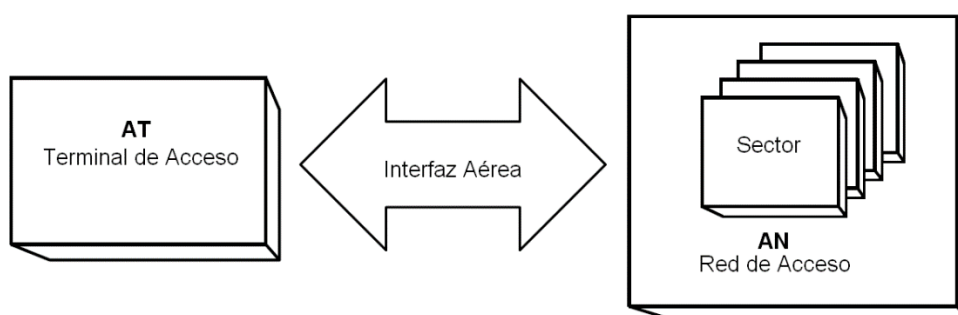
- Entre la IWF y la PDN
- Entre el PSDN y la PSTN
- Entre el AAA y el HA
- Entre el HA y la PSDN
- Entre la PSDN y el AAA (Muñoz, 2006) (Third Generation Partnership Project 2 3GPP2, 2007)

### 2.2.3.2. CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0

El modelo de referencia de arquitectura EVDO representa el sistema como una conexión de la terminal de acceso a la red de acceso a través de la interfaz aérea. La terminal de acceso (AT) es la entidad física que proporciona conectividad de datos a los usuarios a través de una red de acceso. Las ATs son equivalentes a las Estaciones Móviles (MS) en los estándares CDMA2000.

La red de acceso (AN) es una entidad física que proporciona conectividad de datos entre la Red de Datos de Conmutación de Paquetes (PDSN) y el AT. La AN corresponde a las estaciones base (BSS) dentro de las normas cdma2000 y se componen de sectores. Un sector es la parte de la red que proporciona un canal de CDMA.

La Figura 6 representa la relación entre los elementos del modelo de referencia EVDO.



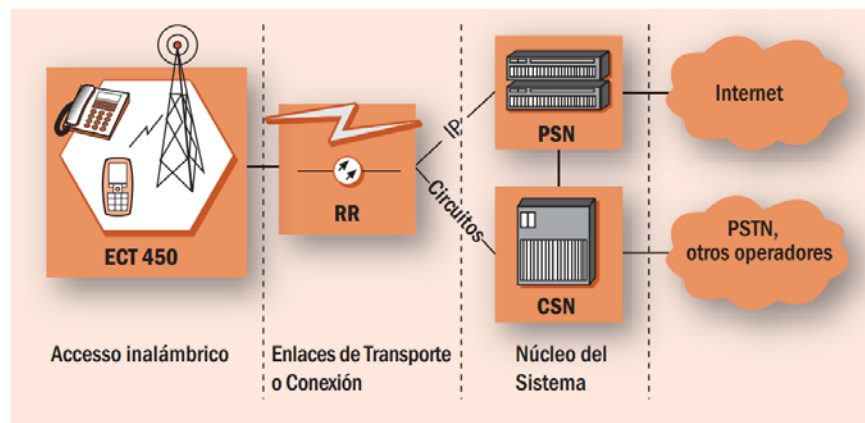
**Figura 6. Modelo de Referencia de la Arquitectura EV-DO**

La última parte del modelo de referencia es la interfaz aérea, una entidad lógica donde fluye la información entre la AT y la AN. Este flujo de información se conoce como un enlace. Cada enlace tiene múltiples canales, configurados en términos de

estructura, frecuencia, modulación, codificación y el nivel de potencia de salida (Korowajczuk, De Souza, & Moreira, 2004).

### 2.2.3.3. CDMA 450

La arquitectura de un sistema CDMA 450 ofrece los servicios tanto de voz como de datos y la podemos observar en la Figura 7. Tanto su estructura y sus componentes de hardware/software son idénticos con los que tienen las redes CDMA2000, con la excepción de que las interfaces aéreas en las estaciones base y los terminales móviles trabajan en la banda de 450 MHz.



PSN (*Packet Switching Node*): Nodo de Conmutación de Paquetes.

CSN (*Circuit Switching Node*): Nodo de Conmutación de Circuitos.

PSTN (*Public Switched Telephone Network*) Red de Telefonía Pública Conmutada.

**Figura 7. Estructura de una Red CDMA 450**

**Fuente:** (Nedevschi, Surana, & Du, 2006).

Los principales componentes de la red son:

- **La Red de Acceso Radio:** La red de acceso está compuesta por todas las estaciones base (BTS) desarrolladas a lo largo del área de cobertura. Estas estaciones son las responsables de la comunicación de la red con los terminales móviles a través de la interfaz aérea. Una BTS contiene el hardware y el software que realiza el procesamiento de la señal necesario para ejecutar la interfaz radio y comunicarse con los servidores y routers de la red de núcleo (Core Network). También contiene todos los componentes radio que envían y reciben la señal RF hacia y desde los dispositivos móviles.
- **La Red de Transporte:** Esta red dispone de las líneas de comunicación de larga distancia que conectan diversos componentes del sistema. La red de transporte se divide en:
  - *La Red de Backbone.*- Esta red conecta varios nodos de conmutación de circuitos (CSN) y los nodos de conmutación de paquetes (PSN).
  - *La Red de Acceso.*- Esta red proporciona el tráfico de cada estación base a su correspondiente nodo de conmutación
- **La Red de Núcleo:** La red de núcleo contiene los equipos necesarios de conmutación de paquetes y de circuitos, las puertas de enlace (gateway) que conectan a otras redes, así como algunos servidores que son responsables de la administración de la red, el monitoreo, la prestación de servicios adicionales, etc. La red de núcleo usualmente consiste de múltiples CSNs y PSNs, así como de un Sistema de Gestión de Red (NMS).
  - *Los Nodos de Conmutación de Circuito (CSN).*- Permiten la conmutación de circuitos entre los circuitos de voz. Son responsables de la señalización y de asegurar la comunicación con otras redes de

telecomunicaciones fijas y móviles. Estos nodos solamente transportan el tráfico de voz 1xRTT.

- *Los Nodos de Conmutación de Paquetes (PSN).*- Son responsables de la conmutación de paquetes dentro de la red y de asegurar la conexión IP con la Internet. Esos nodos llevan el tráfico 1xRTT de voz y 1x EV-DO de datos.
- *El Sistema de Gestión de Red (NMS).*- Realiza la gestión de redes, la configuración y monitoreo de la misma (Nedevschi, Surana, & Du, 2006).

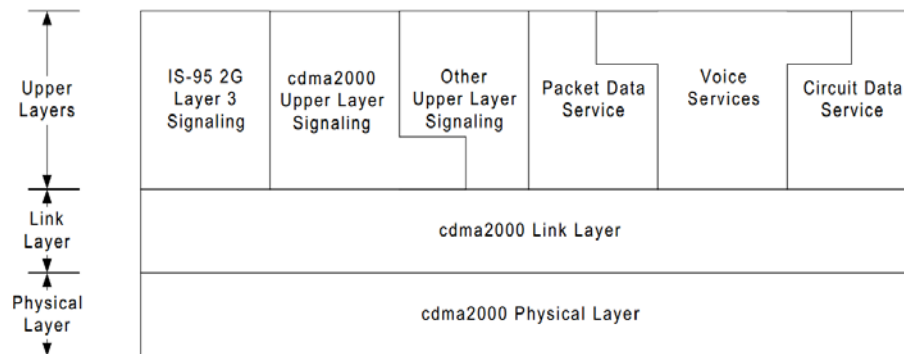
#### **2.2.4. Modelo de Referencia del Sistema CDMA2000**

Los sistemas CDMA2000 tienen su estructura funcional similar al modelo OSI (Open System Interconnection), el cual se encuentra dividido en siete capas. La ventaja que se obtiene al trabajar con el modelo OSI es la independencia que dispone cada capa dentro de sus funciones a la vez que disponen de un método de comunicación entre las mismas mediante el uso de protocolos.

En el sistema CDMA2000 disponemos de una estructura de capas la cual está diseñada para proporcionar de los servicios de voz, paquetes de datos y los servicios de voz y datos de manera simultánea. En la Figura 8 podemos apreciar la estructura funcional del modelo CDMA2000 cuya referencia es el modelo OSI.

#### **2.2.5. Capa Física**

La capa física de la interfaz aérea de CDMA2000 está diseñada para proporcionar un marco flexible para apoyar los servicios de voz y datos mediante la conmutación de circuitos.



**Figura 8. Estructura del Modelo OSI para la tecnología CDMA2000**

**Fuente:** (Etemad, 2004).

La canalización de radio de las redes CDMA2000 se basa en las máscaras de transmisión utilizadas en el estándar EIA-TIA95A/B, lo que permite el despliegue gradual de múltiples portadoras de los portadores 3G-CDMA junto a un portador 2G-CDMA. La canalización de radio y de código está diseñada para permitir la compatibilidad hacia atrás y la superposición de los sistemas 3G y 2G desplegados en el mismo espectro (Etemad, 2004).

### **Enlace Directo**

Las mejoras clave de la tecnología CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0 de la capa física del enlace descendente son:

- Paquetes cortos (es decir, 128, 256 y 512 bits por paquete)
- Mayores tasas máximas de datos (2,4576 Mb/s) y cuantificación de tasa de datos más finas

Los paquetes de la capa física del enlace directo de las redes CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0 se definen por sus formatos de transmisión. El formato de transmisión es



una terna ordenada y definida por el tamaño de paquete de capa física (bits), la duración nominal de paquetes (ranuras o slots) y la longitud del preámbulo (chips). Por ejemplo, (128, 16, 1024) indica que el paquete tiene una carga útil de 128 bits, la duración nominal de 16 ranuras, y un preámbulo de 1024 chips. La tecnología CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0 introduce nuevos tamaños de paquetes de 128, 256, 512 y 4096 bits. Además las redes CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0 permite tramos nominales a través de los 16 slots, lo que resulta mayores velocidades de datos que van desde 4,8 kbps a 2.4576 Mbps.

El tamaño del paquete de la capa física en el enlace directo de la tecnología CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0 es de 1024 bits, y el paquete puede contener sólo unos pocos bits de tráfico sensibles al retardo con el resto de los bits hechos de relleno. La mejora de la eficiencia de embalaje para terminales en condiciones de canal pobres se puede lograr mediante el uso de paquetes cortos con tamaños de carga útil de 128, 256, o 512 bits.

### **Enlace Reverso**

Las mejoras de la capa física clave para el enlace reverso de la tecnología CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0 son:

- Capa física HARQ y soporte para la capa MAC ARQ.
- Las tasas más altas de datos (velocidad de datos máxima de 153.6 kbps) y cuantificación de tasa de datos más finas.

*ARQ híbrido:* Las ganancias sustanciales en la capacidad del enlace reverso se logra en las redes CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0 debido a la utilización de la capa física HARQ. Se introduce la tecnología HARQ en el enlace ascendente con el fin de

explotar el exceso de  $E_b/N_0$  (relación energía por bit/densidad espectral de potencia de ruido) debido a las imperfecciones de control de potencia y variaciones del canal. Con HARQ, las transmisiones de paquetes de enlace ascendente se escalonan en el tiempo para permitir que la red de acceso demodule y decodifique los paquetes y luego transmite un ACK al terminal móvil que indica si el paquete transmitido ha sido decodificado.

*Modulación de la Capa Física:* Las redes CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0 soportan las modulaciones de alto orden como la modulación BPSK para el enlace ascendente y las modulaciones QPSK (38,4 – 614,4 Kbps), 8PSK (921,6; 1843,2 kbps) y 16 QAM (1228,8; 2457,6 kbps). Este tipo de modulación es similar al que se utiliza en las redes HSPA para el enlace descendente (Cisco, 2009). CDMA2000 EV-DO Rev. 0 emplea el control de la velocidad de datos a través de la modulación y codificación adaptativa, lo que permite maximizar el throughput según las condiciones del canal. Este proceso es similar al aplicado en HSPA pero en EV-DO la estación base realiza el seguimiento de la petición de la velocidad de datos deseada desde el terminal de usuario mientras que en HSPA esta realimentación es una recomendación y la Estación Base toma la decisión final (Dalhman, Parkvall, & Skold, 2011).

#### **2.2.6. Capa de Enlace**

La capa de enlace proporciona el soporte de protocolos y los mecanismos de control para prestar los servicios de transporte de datos. Esta capa es compatible con distintos niveles de fiabilidad y las características de la Calidad de Servicio (QoS) de acuerdo a las necesidades del servicio específico de las capas superiores. Finalmente, la capa de enlace realiza todas las funciones que son necesarias para rastrear las

necesidades de transporte de datos de las capas superiores dentro de las capacidades y características específicas de la capa física. En particular, los datos lógicos rastreados de la capa de enlace y los canales de señalización que se ubican dentro de los canales codificados que se encuentran especificados permiten el soporte de la codificación y la modulación de la capa física.

La capa de enlace se encuentra subdividida en dos subcapas:

- Subcapa de Control de Acceso al Enlace (LAC – Link Access Control)
- Subcapa de Control de Acceso al Medio (MAC – Medium Access Control)

### **Subcapa LAC**

La subcapa LAC se encarga de transportar información mediante comunicaciones punto a punto a las capas superiores, siendo capaz de soportar una transmisión escalable y con la capacidad para conocer las necesidades y cambios en las entidades de las capas superiores, esto al ser rastreados los canales desde la capa física mediante información lógica y de señalización.

La subcapa LAC da la QoS que requiere cada entidad de las capas superiores garantizando una entrega libre de errores, sin embargo cuando la QoS requerida es mayor a la que puede ofrecer la subcapa LAC, entonces este servicio es dado directamente por la subcapa MAC.

A continuación se enlistan las acciones de enlace soportados por la subcapa LAC:

- Señalización de la capa de enlace para el sistema IS-95.
- Señalización de la capa de enlace para el sistema CDMA2000.

- Empaquetado de la información de la capa de enlace para los sistemas CDMA2000.
- Servicio de envío de información mediante circuitos conmutados de la capa de enlace para los sistemas CDMA2000
- Un protocolo de Capa de Enlace Nulo (en situaciones donde la subcapa MAC ofrece un QoS adecuado)

### **Subcapa MAC**

La subcapa MAC proporciona una función de control que gestiona los recursos que son suministrados por la capa física (por ejemplo, los canales de código físicos para la comunicación de la información sobre la interfaz aérea) y coordina el uso de esos recursos deseados por las diversas entidades de servicio de la subcapa LAC. Esta función de coordinación resuelve los problemas de contención entre las entidades de servicio de la subcapa LAC dentro de una sola estación móvil, así como las estaciones móviles que se compiten entre sí. La subcapa MAC también es responsable de entregar el nivel de calidad de servicio solicitada por una entidad de servicio de la subcapa LAC.

### **2.2.7. Capas Superiores**

La tecnología de transmisión de radio del sistema CDMA2000 (RTT) proporciona un marco de trabajo abierto y flexible para la inclusión de los servicios de capas superiores en diversas configuraciones en función de las capacidades que se requieren y de la red circundante que está integrada a la RTT. Las Capas Superiores contienen diversos servicios que se dividen en tres categorías básicas:

- **Servicios de Voz:** Servicios de Telefonía (incluye acceso a la Red Telefónica Conmutada (PSTN), la comunicación entre dispositivos móviles, los servicios de voz mediante teléfonos fijos y ordenadores). Las configuraciones que disponen los servicios de voz permiten tener una compatibilidad con las tecnologías CDMA anteriores (TIA/EIA-95-B) mediante el uso de un códec de voz compatible, además puede transportar los servicios de voz mediante la conmutación de circuitos o de paquetes.
- **Servicio de Transporte de Datos al Usuario Final:** Son los servicios que ofrecen cualquier tipo de datos a favor del usuario final los cuales incluyen el servicio de paquetes de datos (servicio IP), servicio de circuitos de datos y el servicio de mensajería corta (SMS). Estos servicios se dividen en servicios de paquete de datos (TCP, UDP, etc.) y los servicios de circuito de datos (Acceso Dial-Up, FAX, Servicios ISDN, etc.)
- **Señalización:** Servicios que controlan todos los aspectos de la operación de la estación móvil. Estos servicios incluyen la señalización con tecnologías anteriores (2G IS-95) y su correspondiente parte que incluye la señalización hacia las nuevas tecnologías dentro de lo que se refiere al usuario final (Telecommunications Industry Association TIA, 1998).

## 2.3. LTE

### 2.3.1. Definición

LTE (Long-Term Evolution) es una tecnología de radio móvil que está diseñado para proseguir a las redes 3G WCDMA / HSDPA / HSUPA, incluso a las redes CDMA. Su característica principal para los usuarios es su tasa de transferencia de

datos la cual ofrece una mayor velocidad, a pesar de que también mejora la eficiencia y la capacidad de las redes inalámbricas.

Aunque LTE no es el nombre de la propia norma, a menudo se utiliza de esa manera. El estándar real se le denomina 3GPP Release 8. LTE es considerado por muchos como una tecnología "4G", tanto porque es más rápido que el 3G, y ya que utiliza una arquitectura *all IP* todo IP en el que todo el diseño de la red (incluyendo voz) se maneja como datos, similar a la Internet (Phone Scoop, 2012).

### **2.3.2. Requisitos y Objetivos de LTE**

Existen varios requerimientos planteados al momento de la realización de la tecnología LTE. Estos requerimientos clave fueron cristalizados por parte de la 3GPP en el año de 2005 y se los puede resumir de la siguiente manera:

- Reducción de los retardos en la comunicación, tanto en términos de establecimiento de la conexión y la latencia de la transmisión
- Aumento de las tasas de datos de usuario
- Aumento de la tasa de bits en el borde de las células, para la uniformidad de la prestación de servicios.
- Reducción del coste por bit, lo que implica una mayor eficiencia espectral
- Mayor flexibilidad de uso del espectro
- Arquitectura de red más simple
- Movilidad sin fallas o fisuras en la red, incluso entre diferentes tecnologías de acceso de radio
- Consumo de energía razonable para el terminal móvil.

Para abordar estos objetivos, el diseño del sistema LTE cubre tanto la interfaz de radio y la arquitectura de la red de radio.

### **Requerimientos de Rendimiento del Sistema**

Todas las mejoras que se obtengan en el rendimiento del sistema en comparación con los sistemas existentes representan uno de los principales requisitos de los operadores de redes para garantizar la competitividad de LTE y por lo tanto para despertar el interés del mercado.

En la Tabla 4 se resume los principales requisitos de desempeño a la que la primera versión de LTE fue diseñado.

### **Tasas de Transferencia de Datos y Eficiencia Espectral Máximas**

La tasa de datos máxima se la estima en base al porcentaje de espectro utilizado y, para los sistemas MIMO, en base al mínimo número de antenas transmisoras y receptoras. La tasa de datos máxima se la define como el máximo throughput por usuario suponiendo que todo el ancho de banda se le asigna a un único usuario con el mayor esquema de modulación, de codificación y el número máximo de antenas soportadas.

La máxima eficiencia espectral se obtiene simplemente al dividir la tasa de datos máxima por la asignación de las frecuencias utilizadas.

Las tasas de datos máximas para el enlace descendente y el enlace ascendente en el Release 8 de LTE se fijaron en 150 Mbps y 50 Mbps, respectivamente, dentro de un ancho de banda de 20 MHz, que corresponde a sus respectivas eficiencias espectrales pico de 5 y 2,5 bps / Hz.

Tabla 4.

## Resumen de los requerimientos clave del Release 8 de LTE

		<i>Requerimiento Absoluto</i>	<i>Requerimiento del Release 6 (Comparación)</i>	<i>Comentarios</i>	
<i>Downlink</i>	Máxima Velocidad de Transmisión	> 100 Mbps	14.4 Mbps	LTE en 20 MHz FDD Multiplexación Espacial 2 X 2 Referencia: HSDPA en 5 MHz FDD, Transmisión de una Antena LTE: Multiplexación Espacial 2 X 2 Receptor con IRC (Combinación de Rechazo de Interferencias) Referencias: HSDPA, receptor rastrillo (rake), 2 Antenas Receptoras	
	Máxima Eficiencia Espectral	> 5 bps/Hz	3 bps/Hz		
	Eficiencia Espectral Promedio de la Célula	> 1.6 – 2.1 bps/Hz/célula	0.53 bps/Hz/célula		
	Eficiencia Espectral del Borde de la Célula	> 0.04 – 0.06 bps/Hz/Usuario	0.02 bps/Hz/Usuario		10 usuarios por célula
	Eficiencia Espectral en Broadcast	> 1bps/Hz	N/A		Portadora dedicada para el modo broadcast
<i>Uplink</i>	Máxima Velocidad de Transmisión	> 50 Mbps	14.4 Mbps	LTE en 20 MHz FDD Referencia: HSUPA en 5 MHz FDD, Transmisión de una Antena LTE, Transmisión de una Antena Receptor con IRC Referencias: HSDPA, receptor rastrillo (rake), 2 Antenas Receptoras	
	Máxima Eficiencia Espectral	> 2.5 bps/Hz	3 bps/Hz		
	Eficiencia Espectral Promedio de la Célula	> 0.66 – 1.0 bps/Hz/célula	0.53 bps/Hz/célula		
	Eficiencia Espectral del Borde de la Célula	> 0.02 – 0.03 bps/Hz/Usuario	0.02 bps/Hz/Usuario		10 usuarios por célula
	Latencia de Plano del Usuario	< 10 ms			
<i>Sistema</i>	Latencia en la Conexión Set-Up	< 100 ms		Estado de Reposo → Estado Activo	
	Ancho de Banda Operativo	1.4 – 20 MHz	5 MHz	Requerimiento inicial a 1.25 MHz	
	Capacidad en la VoIP	Las Redes Móviles de Próxima Generación debe ser menor a 60 sesiones/MHz/célula			

Fuente: (Sesia &amp; Toufik, 2009).



### **Throughput de la Célula y su Eficiencia Espectral**

El Rendimiento a nivel de célula es un criterio importante ya que se relaciona directamente con el número de sitios de las células que un operador de red requiere y por lo tanto al coste de capital de la implementación del sistema. Para la versión Release 8 de LTE se optó por evaluar el rendimiento a nivel celular con los modelos de tráfico en cola completa (full-queue) es decir, suponiendo que nunca hay una escasez de datos a transmitir y que existe una carga relativamente alta del sistema, por lo general de 10 usuarios por célula.

Los requisitos a nivel celular se definen en función de los siguientes parámetros:

- Throughput Promedio de la Célula [bps / célula] y la eficiencia espectral [bps / Hz / célula]
- Throughput Promedio de la Usuario [bps / usuario] y la eficiencia espectral [bps / Hz / user]
- Throughput Promedio del borde de la célula [bps / usuario] y la eficiencia espectral [bps / Hz / user]

### **Movilidad y Rangos de las Células**

LTE puede soportar comunicaciones con terminales en movimiento a velocidades de hasta 350 km/h, o incluso hasta 500 km/h, dependiendo de la banda de frecuencia.

Estos requisitos significan que el traspaso entre células (handover) tiene que ser posible sin ninguna interrupción, en otras palabras, con un retardo imperceptible y con una transmisión fiable de los servicios de datos.

Estos objetivos han de ser alcanzados por el sistema de LTE en células típicas de un radio de hasta 5 km, mientras que la operación debe ser posible para rangos de células de 100 km o más para implementaciones de área extendida.

### **Capacidad de LTE**

La capacidad del sistema de LTE no depende solamente del throughput alcanzable sino que también depende del número de usuarios a la vez ubicados dentro de una célula que puede ser soportada por la señalización de control. Para este último aspecto, LTE tiene la obligación de soportar al menos 200 usuarios activos por célula para asignaciones de espectro de hasta 5 MHz, y al menos 400 usuarios por celda para una asignación de espectro más amplio. Sólo un pequeño subconjunto de estos usuarios debería activamente transmitir y recibir datos en cualquier instante, dependiendo por ejemplo, de la disponibilidad de los datos a transmitir y las condiciones predominantes del canal de radio.

### **Costo de implementación e interoperabilidad**

Además de los aspectos de rendimiento del sistema otras consideraciones son importantes para los operadores de red. Estos incluyen la reducción de costos de implementación, flexibilidad del espectro y una mayor interoperabilidad con los sistemas heredados.

### **Asignaciones del Espectro y Modos de Duplexación**

Debido al incremento de la demanda del espectro radioeléctrico para las comunicaciones móviles, la tecnología LTE requiere ser capaz de operar en una amplia gama de bandas de frecuencia y con asignaciones de espectro de diversos tamaños, tanto en el enlace ascendente y el enlace descendente. LTE puede utilizar la

asignación de espectro que va desde el rango de 1,4 hasta 20 MHz mediante un solo portador.

Además requiere la capacidad de operar tanto en espectro apareado y no apareado, dependiendo de la disponibilidad de espectro. LTE proporciona soporte para FDD, TDD y la operación half-duplex FDD en un diseño unificado, lo que garantiza un alto grado de coincidencia que facilita la implementación de terminales multimodo y permite realizar roaming a nivel mundial.

### **Interacción con otras Tecnologías de Radio**

La interoperación con otras tecnologías de acceso radioeléctrico es esencial para la continuidad del servicio, especialmente durante la fase de migración en los primeros despliegues de LTE con cobertura parcial, donde con frecuencia se presentan traspaso (handover) o interferencia a los sistemas heredados. LTE se basa en una red de núcleo de paquetes evolucionado que permite la interoperación con diversas tecnologías de acceso, en particular con las tecnologías anteriores 3GPP (GSM / EDGE y UTRAN), así como las tecnologías no pertenecientes a la 3GPP (por ejemplo WiFi, CDMA2000 y WiMAX).

### **Requisitos de la Arquitectura de Red**

LTE es necesario para permitir una implementación rentable mediante el diseño de la arquitectura de red de acceso de radio mejorado que incluye:

- La arquitectura plana que consta de un solo tipo de nodo, la estación base, conocida en LTE como *eNodeB*
- Protocolos eficaces para el apoyo de los servicios de conmutación de paquetes

- Interfaces abiertas y soporte de la interoperabilidad de los equipos de múltiples proveedores
- Mecanismos eficientes de operación y mantenimiento, incluyendo funcionalidades de auto-optimización (Sesia & Toufik, 2009).

### **2.3.3. Tecnologías en la Interfaz de Radio**

#### **Esquemas de Acceso Múltiple**

El esquema de transmisión de acceso múltiple en LTE se basa en la multiplexación del dominio de la frecuencia (FDM). Son utilizadas dos versiones: el Acceso Múltiple del Dominio de la Frecuencia Ortogonal (OFDMA) para el enlace descendente y el Acceso Múltiple del Dominio de la Frecuencia de Portadora Única (SC-FDMA) para el enlace ascendente. OFDMA es un esquema de transmisión muy eficiente que es ampliamente utilizado en muchos sistemas de comunicación digitales, por ejemplo, Digital Video Broadcasting (DVB), WiMax, Redes de Área Local Inalámbrica (WLAN), etc. La razón detrás de la popularidad de OFDMA proviene del hecho de que tiene características muy robustas contra los canales selectivos en frecuencia.

La selectividad en frecuencia es uno de los problemas de transmisión que pueden superarse a través de ecualización, pero la complejidad de la técnica de ecualización es muy alta. Otra razón para elegir OFDMA como el esquema de transmisión del enlace descendente es la flexibilidad que ofrece el ancho de banda, ya al cambiar del número de subportadoras utilizadas puede aumentar o reducir el ancho de banda de la frecuencia utilizada. Mientras SC-FDMA proporciona una baja relación pico a promedio (peak-to-average) entre la señal transmitida la cual es una característica muy deseable para el enlace ascendente ya que nos otorga un uso eficiente del

amplificador de potencia. Esto proporciona un tiempo de alta duración de la batería para los dispositivos móviles.

### **OFDM**

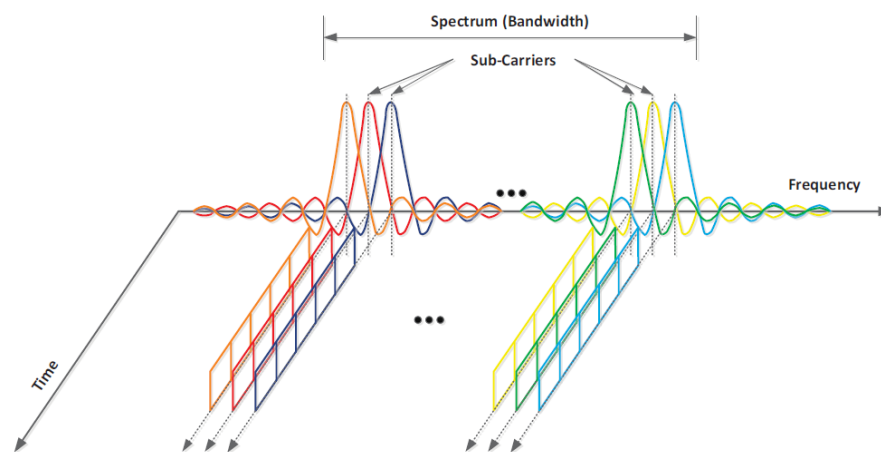
El principio básico de los sistemas de portadora múltiple es la división del ancho de banda total en un gran número de unidades de ancho de banda más pequeños y estrechos, que se conocen como sub-canales. Debido al ancho de banda reducido no existe selectividad de frecuencia en los sub-canales. Como resultado, sólo las ganancias de los sub-canales tienen que ser compensados y no se requieren ninguna técnica de ecualización compleja.

En OFDM los sub-canales son ortogonales entre sí. Esta propiedad no requiere la adición de intervalos de guarda entre los sub-canales y por lo tanto aumenta la eficiencia espectral del sistema. La Figura 9 muestra el principio de ortogonalidad de OFDM; la representación de frecuencia de un sub-canal OFDM es una función *Sinc* (función de muestreo del procesamiento de señales  $\text{Sinc}(x) = \text{Sin}(x)/x$ ) donde si el muestreo se realiza en el espaciado exacto el resultado sólo estará en la sub-portadora del sub-canal y los ceros se ubicarán en el resto de subportadoras en el dominio de la frecuencia. Esto significa que los sub-canales son ortogonales entre sí.

### **OFDMA**

El Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) es un sistema de acceso que utiliza el principio de OFDM para orquestar la distribución de los escasos recursos de radio entre varios usuarios que permiten las comunicaciones multiusuario. Esto se realiza mediante el uso de la Acceso Múltiple del Dominio del

Tiempo (TDMA), donde los usuarios obtienen dinámicamente algunos recursos a las diferentes instancias de tiempo de la programación.

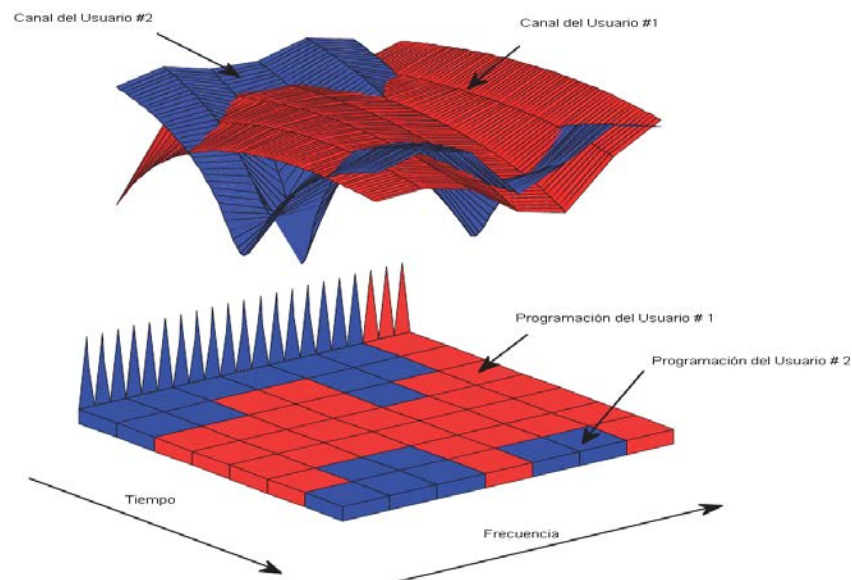


**Figura 9. Señal OFDM en el dominio de la frecuencia y el tiempo**

**Fuente:** (Zaki, 2012).

El Programador de la subcapa MAC en LTE hace uso de las diferentes condiciones de canal de usuario para distribuir los recursos de frecuencia (subportadores) a donde mejor le parezca. Esto representa una asignación de los recursos a los usuarios, por ejemplo, con las mejores condiciones de canal instantáneo (programación Max-CI). Este proceso de distribución está determinado por la disciplina del planificador utilizado.

En la Figura 10 se muestra un ejemplo de programación dependiente del canal entre dos usuarios, donde las subportadoras del sistema se distribuyen entre los dos usuarios en función de quién tiene el mejor canal. Un sistema con dicha programación dependiente de canal es a menudo muy robusto con una mejor capacidad del sistema y una mayor eficiencia espectral que un solo sistema OFDM.



**Figura 10.** Un ejemplo de programación del canal dependiente entre dos usuarios

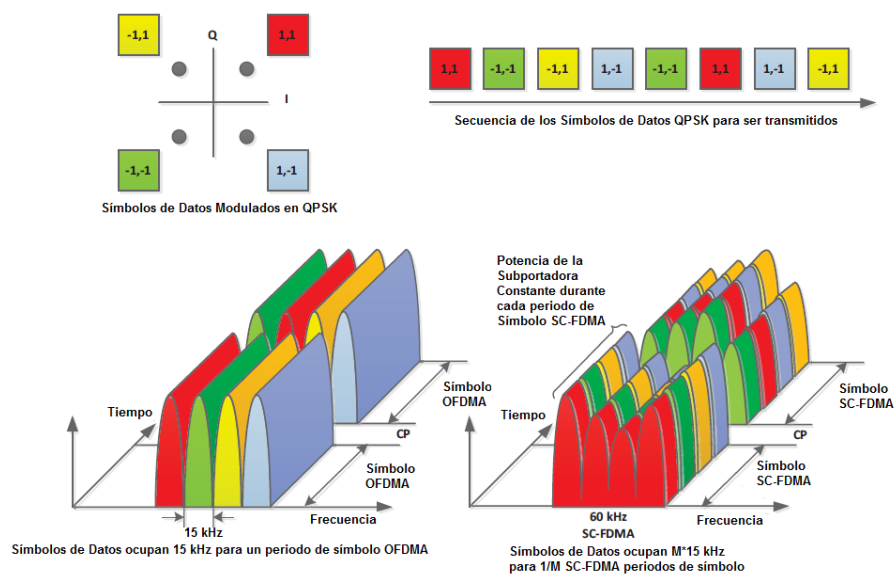
**Fuente:** (Zaki, 2012).

### SC-FDMA

La motivación que había detrás de la elección de SC-FDMA era las características atractivas que posee, es decir que tiene un pico de potencia inferior a la relación promedio existente la cual se considera que es una propiedad muy deseada para tener amplificador de potencia eficiente por lo que permite ahorrar energía de la batería del dispositivo móvil para la transmisión de enlace ascendente.

SC-FDMA es un tipo especial de OFDM que combina el pico más bajo de la relación de potencia promedio con una resistencia a las múltiples trayectorias y la asignación de frecuencias flexibles y eficientes. Como en el enlace descendente se siguen utilizando subportadoras ortogonales similares a OFDMA pero con una

diferencia, que las subportadoras utilizadas para la transmisión son elegidas de manera secuencial y no en paralelo. Una pequeña comparación entre OFDMA y SC-FDMA se la puede visualizar en la Figura 11.



**Figura 11. Comparación entre las Tecnologías OFDMA y SC-FDMA**

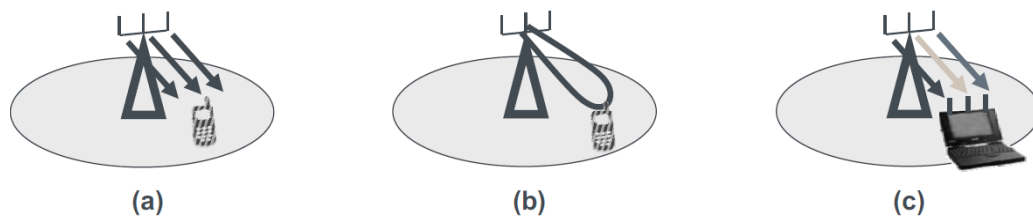
**Fuente:** (Zaki, 2012).

### Tecnología de Múltiples Antenas

El uso de la tecnología de antenas múltiples permite la explotación del dominio espacial. Esto se convierte esencial en la búsqueda de mayores eficiencias espectrales. Mediante el uso de múltiples antenas la eficiencia espectral teóricamente alcanzable escala de forma lineal con un mínimo uso de antenas de transmisión y recepción, por lo menos en los entornos de propagación de radio adecuados.



La tecnología de múltiples antenas abre la puerta a una gran variedad de características, pero no todas ellas entregan fácilmente sus promesas teóricas cuando se trata de la implementación en los sistemas prácticos. Las múltiples antenas pueden ser utilizadas en una variedad de formas, basadas principalmente en tres principios fundamentales, ilustrados esquemáticamente en la Figura 12:



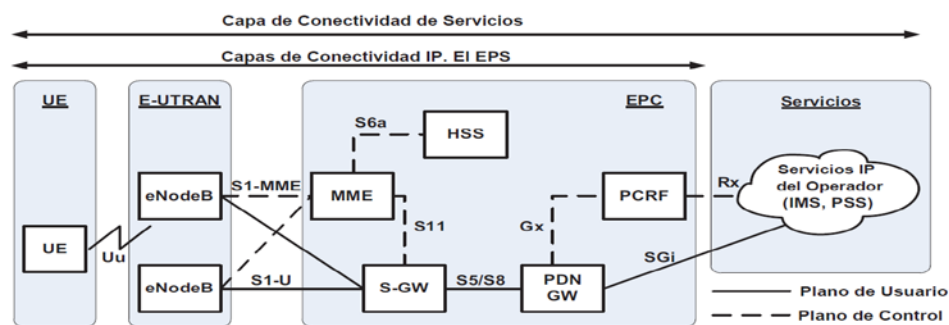
**Figura 12. Tres Beneficios Fundamentales de las Múltiples Antenas: (a) Diversidad en la Ganancia. (b) Ganancia del Array (Arreglo o Matriz). (c) Ganancia de la multiplexación espacial.**

**Fuente:** (Zaki, 2012).

- *Diversidad en la Ganancia:* El uso de la diversidad espacial proporcionada por las múltiples antenas mejoran la robustez de la transmisión en contra del desvanecimiento por múltiples trayectos.
- *Ganancia del Array (Arreglo o Matriz):* La concentración de la energía en una o más direcciones se la realiza a través de la pre-codificación o la formación de haz. Esto también permite que varios usuarios situados en diferentes direcciones sean servidas de forma simultánea (también denominado usuario MIMO (Multiple Input Multiple Output)).
- *Ganancia de la multiplexación espacial:* Transmisión de señal de múltiples flujos a un único usuario en múltiples capas espaciales creados por las combinaciones de las antenas disponibles.

### 2.3.4. Arquitectura de Red

El sistema LTE está diseñado para los servicios de conmutación de paquetes que proporciona la conectividad IP entre la red de datos en paquetes (PDN) y el equipo de usuario (UE) sin interrupción del servicio, incluso durante la movilidad. El sistema de LTE se puede dividir en dos ramas principales: la Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionado (E-UTRAN) y el System Architecture Evolution (SAE). El E-UTRAN evolucionó de la red de acceso radio UMTS. La SAE es compatible con la evolución de la red de núcleo de paquetes, también conocido como núcleo de paquetes evolucionado (EPC). La combinación tanto de la E-UTRAN y la SAE componen el Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS). La Figura 13 muestra la arquitectura general de la red LTE.



**Figura 13. Arquitectura de Red LTE EPS**

**Fuente:** (Zaki, 2012).

Un portador de EPS se define como un flujo de paquetes IP entre el PDN-GW (Packet Data Network Gateway – Puerta de Enlace de la Red de Datos por Paquetes) y el equipo de usuario con las características predefinidas de la Calidad de Servicio (QoS). Tanto el EPC y la E-UTRAN son responsables de establecer y liberar un

portador dependiendo de los requisitos de QoS de la aplicación. En LTE múltiples portadoras se pueden establecer para los usuarios con múltiples servicios, por ejemplo, un usuario puede tener una llamada de voz utilizando el Protocolo de Internet sobre Voz (VoIP) y al mismo tiempo realizar la descarga de un archivo con mediante el protocolo File Transfer Protocol (FTP), o navegar la web utilizando el Protocolo de Transferencia de Hipertexto (HTTP). Cada uno de estos servicios se puede asignar a una portadora diferente.

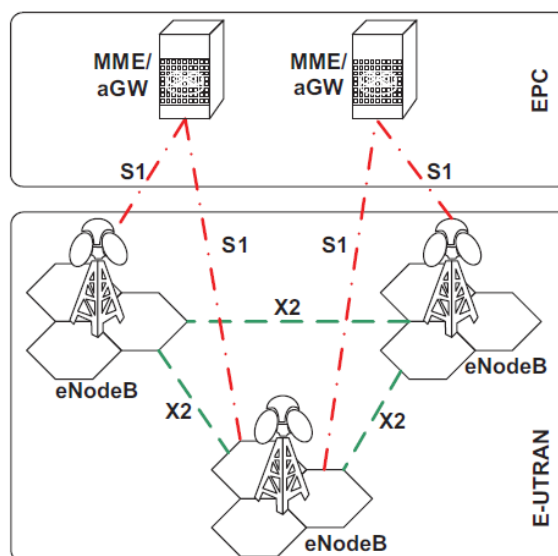
#### *Equipo de Usuario (UE)*

Como su nombre indica, un UE es el dispositivo real que los clientes LTE utilizan para conectarse a la red LTE. El UE puede tomar varias formas; puede ser un teléfono móvil, una tableta o una tarjeta de datos utilizado por el ordenador. Al igual que todos los demás sistemas 3GPP, la UE se compone de dos entidades principales: una tarjeta SIM o lo que también se conoce como servicio de Módulo de Identidad del Usuario (USIM), y el equipo real conocido como Equipo Terminal (TE). La tarjeta SIM contiene la información necesaria proporcionada por el operador para la identificación de usuario y los procedimientos de autenticación. El equipo terminal por otro lado ofrece a los usuarios con el hardware necesario (por ejemplo, el procesamiento, el almacenamiento, el sistema operativo) para ejecutar sus aplicaciones y utilizar los servicios del sistema LTE.

#### *Evolved UTRAN (E-UTRAN)*

La E-UTRAN en LTE consta de eNodosB (Nodos B – Estaciones Base) directamente interconectados que están conectados entre sí a través de la interfaz X2 y a la red central a través de la interfaz S1. Esto elimina uno de los mayores inconvenientes de los antiguos sistemas 3GPP (UMTS / HSPA): la necesidad de

conectar y controlar los Nodos B a través del Controlador de Red de Radio (RNC), que hacen que el sistema sea vulnerable ante fallos del RNC. La arquitectura LTE E-UTRAN se la puede visualizar en la Figura 14.



**Figura 14. Arquitectura LTE E-UTRAN**

**Fuente:** (Zaki, 2012).

El Nodo B mejorado (eNodoB) funciona como un puente entre la UE y el EPC. Proporciona los protocolos de radio necesarios para el equipo de usuario, a fin de ser capaz de enviar y recibir datos y traslada los datos de los usuarios de forma segura sobre la red de transporte de LTE a la PDN GW y viceversa. Se utiliza el protocolo de túnel GTP (Protocolo de Túnel de GPRS), que trabaja en la parte superior de los protocolos UDP / IP. El Nodo B mejorado también es responsable de la programación que es una de las funciones de radio más importantes. El eNodoB programa los recursos del espectro de frecuencias entre los distintos usuarios

mediante la explotación tanto en el tiempo y la frecuencia, garantizando al mismo tiempo diferente calidad de servicio para los usuarios finales. Además, el eNodoB también tiene algunas funcionalidades de gestión de la movilidad, por ejemplo, mediciones de enlace de radio y de señalización de traspaso (handover) para otros eNodosB.

### *Evolved Packet Core (EPC)*

Como se muestra en la Figura 13, el EPC (también conocido como el núcleo de red LTE) se compone de tres entidades principales: la Entidad de Gestión de Movilidad (MME), la Puerta de Enlace de Servicios (S-GW – Serving Gateway) y la Puerta de Enlace de la Red de Datos por Paquetes (PDN-GW). Además, hay algunas otras entidades lógicas como el Servidor de Abonado Local (HSS) y el Policy and Charging Rules Function (PCRF). El propósito principal de la EPC es ofrecer las funcionalidades necesarias para apoyar a los usuarios y establecer sus portadores.

La entidad MME proporciona funciones de control, así como de aviso para el EPC. La MME sólo está implicada en el plano de control. Parte de la MME realiza el apoyo a ciertas funciones que incluyen: autenticación, seguridad, roaming, establecimiento del portador por default / dedicado, seguimiento de la movilidad de los usuarios y el handover. El S-GW es la principal puerta de entrada para el tráfico de los usuarios, donde pasa todo el tráfico IP de los usuarios. Es el punto de anclaje de la movilidad local para el handover entre los Nodos B, así como el anclaje de movilidad para la movilidad interna 3GPP. Además, el S-GW proporciona varias otras funciones como: enrutamiento, direccionamiento y la recopilación de la información de carga/contabilidad. La puerta de enlace de red del paquete de datos por paquetes PDN-GW actúa como el punto de conectividad del usuario para el

tráfico de los usuarios. Es el responsable de asignar las direcciones IP a los usuarios, así como de clasificar el tráfico de usuarios en diferentes clases de calidad de servicio. Además, el PDN-GW actúa como el punto de anclaje de movilidad para la interrelación de las tecnologías no pertenecientes a la 3GPP, como WLAN y WiMax (Zaki, 2012).

### **2.3.5. Interfaz Radio**

La interfaz radio permite la interconexión y el envío de tráfico y señalización entre el terminal móvil y las estaciones base (eNodeB). Los objetivos marcados por el 3GPP para el diseño de la interfaz radio del LTE son:

- *Tasas Elevadas de Transmisión de Datos de Pico*: mayores de 100 Mb/s en el enlace descendente y 50 Mb/s en el ascendente. Para ello se utilizarán modulaciones de elevada eficiencia espectral (64 QAM en el enlace descendente).
- Mejora de la Eficiencia Espectral entre 2 y veces comparada con el sistema UTMS: En particular se espera una eficiencia espectral mayor que 5bits/s/Hz utilizando modulaciones de alta eficiencia espectral y un método de acceso basado en la técnica OFDM.
- Mejora de la Latencia del Sistema:
  - La latencia de la red de acceso radio en el plano de usuario debe ser menor de 10 ms.
  - Reducción Significativa de la latencia en el plano de señalización.

Ello se consigue dotando de inteligencia al eNodeB, es decir ubicando en él la mayor parte de las funcionalidades relacionadas con la gestión del acceso radio.

### *División Funcional y Pila de Protocolos*

La red de acceso radio del sistema LTE está compuesta básicamente por Nodos B a través de los cuales se conectan los terminales móviles a la red, utilizando para ello la denominada interfaz aire del sistema.

El eNodeB se conecta a la red troncal a través de la interfaz S1, que en realidad está desdoblada en dos interfaces diferentes: una para conectarse con el nodo encargado de las funciones de control en la red troncal (MME) y otro que se encarga de las funciones de transferencia de los paquetes de usuario entre el eNodeB y en la red troncal a través del denominado Server Gateway (S-GW).

Opcionalmente, los eNBs pueden conectarse entre sí mediante la denominada interfaz X2 que permite, entre otras funciones, realizar la transferencia de paquetes de usuario entre eNBs durante el proceso de transferencia de llamada (handover) para mejorar sus prestaciones. En la figura 15 se resume la torre de protocolos de la interfaz aire del sistema LTE.

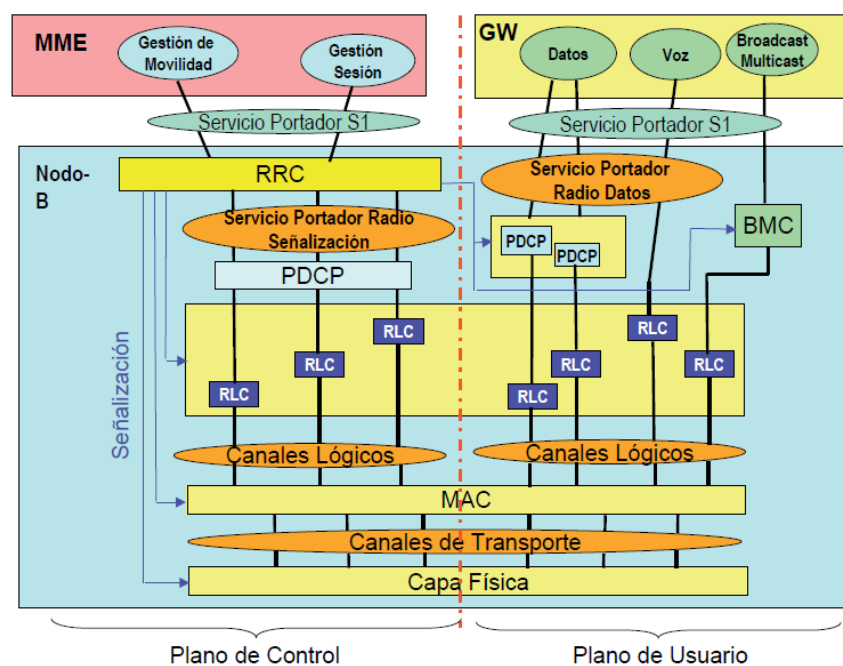
La estructura de esta torre de protocolos se articula en dos planos:

- El plano de usuario, destinado al envío de la información de usuario (paquetes IP generados por el terminal móvil o destinado a él)
- El plano de control o señalización, destinado a transportar los mensajes de control intercambiados entre la red y el terminal móvil, y que permiten un correcto funcionamiento del sistema.

Es importante destacar que el plano de usuario está interconectado al Gateway mediante los denominados Servicios Portadores S1 y por él se transmiten los mensajes de voz, datos o de radiodifusión y de grupo (Broadcast/Multicast). Por el

contrario, el plano de control está interconectado al nodo MME, en donde están ubicadas, entre otras, las funcionalidades de gestión de la sesión y la movilidad y los mecanismos de control de las llamadas.

Desde el punto de vista de la interfaz aire, el envío de paquetes de usuario (paquetes IP) mediante dicha interfaz se gestiona en base al establecimiento de los denominados servicios portadores radio. Cada servicio portador radio tiene asociado un perfil de calidad de servicio (QoS) que la torre de protocolos que caracteriza a la interfaz debe garantizar.



**Figura 15. Torre de Protocolos de la Interfaz Aire del Sistema LTE**

**Fuente:** (Agusti, y otros, LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles, 2010).



Los protocolos utilizados en el plano de usuario de la interfaz aire son los siguientes:

- *Packet Data Convergence Protocol (PDCP)* cuyas principales funciones son: compresión de las cabeceras de los paquetes IP, entrega/recepción ordenada de los paquetes IP desde/hacia las capas superiores, que están ubicadas en el Gateway.
- *Radio Link Control (RLC)*, que permite establecer un enlace fiable a través de la interfaz aire.
- *Medium Access Control (MAC)* que permite un acceso ordenado de los diferentes usuarios (terminales móviles) al medio de transmisión (espectro radioeléctrico).
- Capa física, que proporciona el mecanismo físico de transmisión/recepción a través del espectro radioeléctrico.

Adicionalmente en la Figura 15 también se muestra el denominado *Broadcast/Multicast Control Protocol (BMC)*, que es el encargado de almacenar y gestionar la transmisión de los mensajes de grupo (multicast) o radiodifusión (broadcast) hacia el terminal móvil.

Por lo que respecta al plano de control, comparte con el plano de usuario los protocolos PDCP, RLC, MAC y capa física, e incorpora un nuevo protocolo denominado Radio Resource Control (RRC) que es quien se encarga de la gestión de la conexión a nivel radio entre el terminal móvil y la red (eNB), de la configuración de los servicios portadores, y del envío de mensajes relacionados con la movilidad desde/hacia el terminal móvil.

En tanto que gestionan el comportamiento y las prestaciones del enlace radio, los protocolos PDCP, RLC y MAC se denominan protocolos de capa 2 (Layer 2 protocols) o protocolos de la capa de gestión del enlace. Por su parte el protocolo RRC se entiende como un protocolo de capa 3 en tanto que gestiona funcionalidades a nivel de red. Obviamente el protocolo de la capa física es un protocolo de capa 1.

### **2.3.6. Capa Física**

La capa física de la interfaz aire del sistema LTE se basa en la utilización de técnicas de acceso múltiple OFDMA en el enlace descendente (eNodeB a Móvil) y SC-FDMA en el enlace ascendente (Móvil a eNodeB). SC-FDMA es un término engañoso, ya que SC-FDMA es esencialmente un sistema de múltiples portadoras que reutiliza muchos de los bloques funcionales incluidos en la cadena de señal del receptor del UE OFDM. La principal ventaja de SC-FDMA sobre OFDM convencional es un PAPR inferior (relación de potencia pico a promedio) (en aproximadamente 2 dB) de lo que sería posible utilizando OFDM.

En ambos casos la separación entre subportadoras es fija e igual a 15 KHz. El número de subportadoras disponibles varía en función de la canalización del sistema, tal como se indica en la Tabla 5.

La capa física del sistema LTE está pensada para operar en bandas altas de UHF, por encima de los 450MHz y hasta los 3,5 GHz. De hecho el estándar define hasta 40 posibles bandas de operación trabajando bien en modo de duplexación por división de frecuencia (FDD) o bien en duplexación por división en el tiempo TDD. La mínima separación entre posibles frecuencias portadoras, denominada *Channel Raster*, es de 100 KHz.

**Tabla 5.****Canalización en el Sistema LTE**

<i>Canalización</i>	<i>1,4 MHz</i>	<i>3 MHz</i>	<i>5 MHz</i>	<i>10 MHz</i>	<i>15 MHz</i>	<i>20 MHz</i>
<b>Tamaño FFT</b>	128	256	512	1024	1536	2048
<b>Número de Subportadoras Disponibles</b>	73	181	301	601	901	1201

**Fuente:** (Zyren, 2007) .

Utilizando técnicas MIMO (2x2) y para una canalización de 20 MHz es posible alcanzar una velocidad de transmisión de pico a nivel de capa física de 150 Mbps en el enlace descendente y 75 Mbps en el ascendente.

Los posibles esquemas de modulación son: QPSK, 16QAM y 64QAM para el enlace descendente (DL) y QPSK, 16QAM y 64QAM para el enlace ascendente (UL) dependiendo de las condiciones del canal (Agusti, y otros, LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles, 2010) (Zyren, 2007).

## **CAPÍTULO III**

### **ANÁLISIS DE LAS REDES INALÁMBRICAS RURALES**

#### **3.1. Caso de Estudio: Comunidades del Milenio**

##### **3.1.1. Análisis de Mercado**

Dentro de las políticas del Plan del Buen Vivir que está ejecutando el Gobierno Nacional se ha promovido la construcción de comunidades en aquellas zonas donde se ha realizado la explotación de los recursos hidrocarburíferos. Dentro del plan que desea ejecutar el Gobierno Nacional se han propuesto construir 200 Comunidades del Milenio a lo largo de la Amazonía Ecuatoriana.

Actualmente existen construidas 2 Comunidades del Milenio, las cuales se encuentran en la Provincia de Sucumbíos: Pañacocha y Playas de Cuyabeno.

La parroquia Pañacocha que significa “laguna de pirañas” se encuentra ubicada en el Cantón Shushufindi, provincia de Sucumbíos a unos 70 km al este del campo Limoncocha y a 30 km al norte del campo Edén Yuturi. Está asentada a orillas del río Napo, por lo que el acceso es fluvial. La población de Pañacocha es de aproximadamente 860 habitantes de acuerdo al censo realizado en 2010, el cual se encuentra dividida en 438 hombres y 422 mujeres. La principal actividad que se genera en la zona es la producción agrícola que sirve como principal sustento para el consumo familiar.

El proyecto de la Comunidad del Milenio que se ejecuta en Pañacocha y se observa en la Figura 16 abarca las comunas Kichwa de Pañacocha y Corazón de Jesús y tiene un área total de 0.145 km<sup>2</sup>.



**Figura 16. Vista Aérea de la Comunidad del Milenio Pañacocha**

**Fuente:** (Presidencia de la República del Ecuador, 2014).

La parroquia Playas de Cuyabeno como se observa en la Figura 17 se encuentra ubicada en la ribera del Río Cuyabeno aproximadamente a 5 horas de Lago Agrio donde se localiza la comuna Kichwa Playas de Cuyabeno. La población de esta comunidad asciende a unos 392 habitantes, en su mayoría dedicados a la pesca y a la agricultura. El área total es de 0.1787 km<sup>2</sup>.

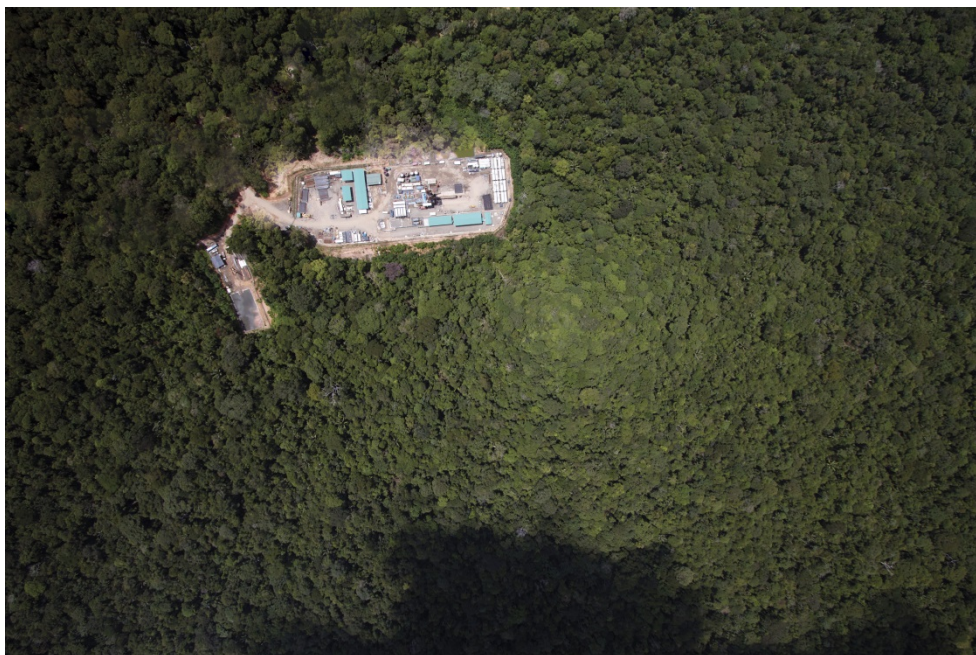


**Figura 17. Entrada a la Comunidad Playas de Cuyabeno**

**Fuente:** (Presidencia de la República del Ecuador, 2014).

Estas dos comunidades han sido creadas en base a las reformas efectuadas a la Ley de Hidrocarburos en el año 2010, las cuales determinaron que el 12% de las utilidades y excedentes petroleros sean invertidos en las poblaciones aledañas a los proyectos hidrocarburíferos (Ministerio de Recursos Naturales No Renovables, 2013).

El campo de explotación Petrolífera Pañacocha cuya vista área se observe en la Figura 18 y al que pertenecen estas dos comunidades fue inaugurado en Octubre de 2010 por el actual Gobierno Nacional el cual se encuentra manejado por la empresa pública EP Petroamazonas. La inversión destinada para la ejecución de este proyecto fue de USD 264 millones. La producción estimada para finales del año 2011 es de un máximo de 25 mil barriles diarios de petróleo, por lo que se prevé una rentabilidad del 125%.



**Figura 18. Campo de Explotación Petrolífera Pañacocha**

**Fuente:** (Petroamazonas, 2014)

Tomando en cuenta el cálculo de las utilidades que se generan mediante la explotación de crudo en el Campo Pañacocha se destinó un total de USD 26 millones para el financiamiento de las Comunidades del Milenio de Pañacocha y Playas de Cuyabeno destinadas de la siguiente manera como se puede observar en la Tabla 6.

**Tabla 6.**

**Asignación de Fondos de las Utilidades de la Empresa Petroamazonas EP a las Comunidades del Milenio**

<i>Comunidad del Milenio</i>	<i>Presupuesto</i>
<b>Parroquia Playas de Cuyabeno</b>	USD 14 Millones
<b>Parroquia Pañacocha</b>	USD 12 Millones

**Fuente:** (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2013)

La comunidad Playas de Cuyabeno fue inaugurada en el mes de Octubre de 2013. Dentro de esta comunidad se han construido 82 viviendas con un área de 96 m<sup>2</sup> cada una. Las casas disponen de los siguientes servicios: tres habitaciones, una sala, una computadora con internet de fibra óptica, utensilios de cocina, una cocina de cuatro quemadores y un refrigerador.

Además de disponer de los servicios básicos como agua potable, electricidad, alcantarillado la comunidad Playas de Cuyabeno dispone de otros servicios como vías para bicicletas, Coliseo, Mercado de Acoplo de Víveres, Biblioteca, Espacios Deportivos, Puerto Fluvial, Helipuerto y como punto fundamental para el desarrollo de la comunidad se ha construido la Unidad Educativa del Milenio Víctor Dávalos el cual cuenta con: 10 computadoras, un proyector, un router, 10 reguladores de voltaje, una pizarra interactiva y una impresora, que benefician a 250 alumnos (Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información, 2013).

Mientras la comunidad de Pañacocha fue inaugurada en el mes de Enero de 2014. El plan habitacional creado en esta comunidad alberga aproximadamente unas 80 casas, cada una de ellas tiene un área de 96,04 m<sup>2</sup>. Dentro de la comunidad se dispone de los siguientes servicios como Electricidad, Agua Potable, Espacios Verdes, Coliseo, Canchas Deportivas, una Unidad de Policía Comunitaria (UPC), dispensario médico y una Unidad Educativa del Milenio denominada Pedro Vicente Maldonado. En los avances tecnológicos referentes a la Unidad Educativa del Milenio dispone de los siguientes equipos: 24 computadoras, 1 proyector, 1 pizarra para tiza líquida, una impresora y 25 reguladores de voltaje, el cual beneficia a 05 estudiantes de la comunidad.

Otro punto importante dentro de la infraestructura tecnológica de la Comunidad del Milenio de Pañacocha es que se encuentra dotada de un Infocentro Comunitario. Dicho infocentro dispone de 6 computadoras, 2 cabinas telefónicas, mobiliario para



computadoras, proyector y vídeo cámaras (Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información, 2014).

### **3.1.2. Análisis del Perfil Geográfico**

#### **Comunidad Pañacocha**

La parroquia de Pañacocha se encuentra ubicada dentro del Bosque Protector Pañacocha. Dentro de esta área protegida se tiene una temperatura que oscila entre los 25 a 30° C. La altura promedio de tiene esta área protegida está entre los 200 a 300 m.s.n.m.

El tipo de vegetación que se presenta en esta zona es el Bosque Siempreverde de la Llanura no inundable de la Amazonía cuyos bosques se encuentran situados en áreas con una topografía mayormente plana con pocas colinas formadas principalmente en valles disectados por pequeños ríos.

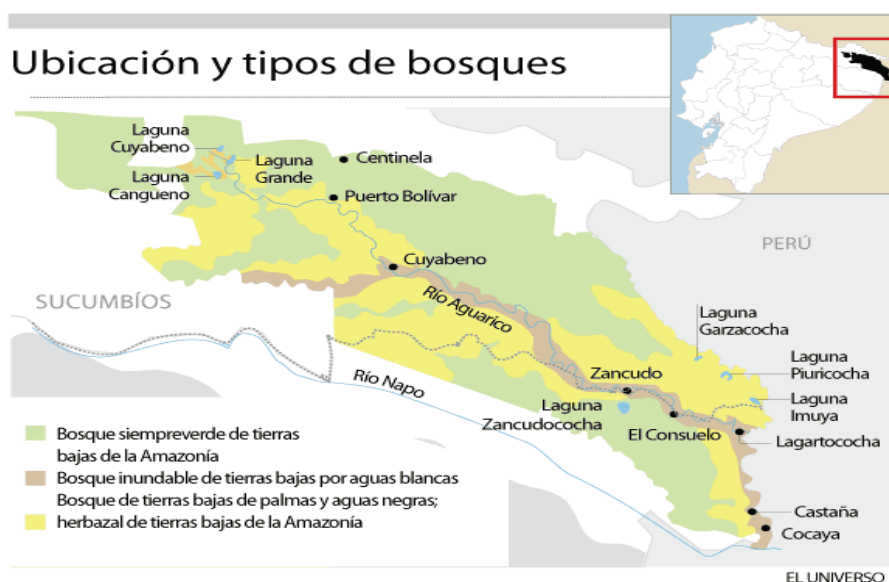
Estos bosques comprenden la frontera occidental de los bosques amazónicos que se caracterizan por tener una similitud climática y geológica, además de una altísima diversidad vegetal y animal. La humedad relativa mensual varía entre 80–94%. Según datos del INAMHI la temperatura mensual varía entre 25 a 30 ° C entre la máxima y la mínima registradas. Estos bosques son considerados altos ya que la altura que poseen sus árboles está entre los 35 a 40 m (Gobierno Autónomo Descentralizado de Pastaza, 2013).

#### **Comunidad Playas de Cuyabeno**

Mientras que la comunidad de Playas de Cuyabeno se encuentra dentro de la Reserva Faunística Cuyabeno. Su temperatura promedio es de 25°C. Su rango altitudinal es entre los 200 – 280 m.s.n.m.

El tipo de bosque al que pertenece la comunidad de Playas de Cuyabeno es el Bosque Inundable de tierras bajas por Aguas Blancas el cual se encuentra principalmente a lo largo de los ríos Aguarico y San Miguel. En las grandes crecidas de estos ríos todos estos bosques se inundan por varios días.

Es común la presencia de numerosos riachuelos y la constante caída de árboles. En buen estado de conservación el bosque llega hasta 30–40 m de alto. En la Figura 19 podemos apreciar el tipo de vegetación y la ubicación de los bosques que se encuentran en la Reserva de Producción Faunística Cuyabeno (Ministerio del Ambiente, 2007).



**Figura 19. Ubicación y Tipos de Bosques de la Reserva de Producción Faunística Cuyabeno**

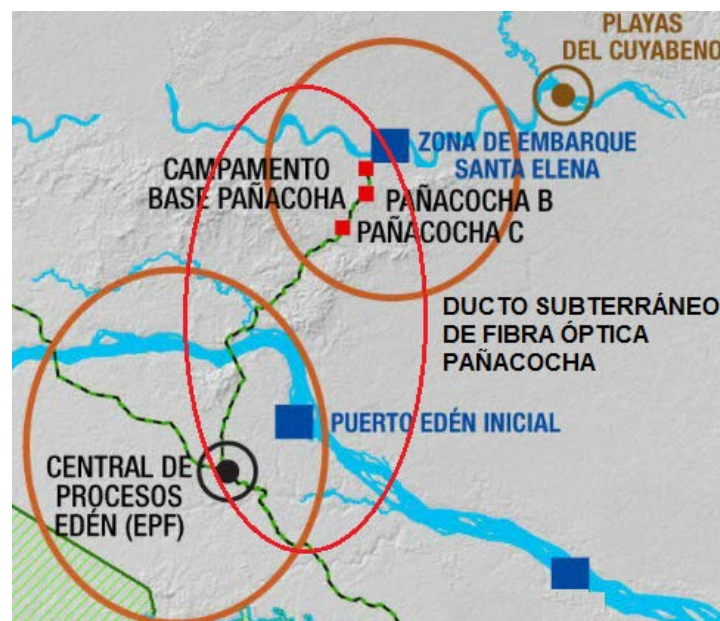
**Fuente:** (Huagra Ñaupá, 2010).

### 3.1.3. Redes de Telecomunicaciones existentes en las comunidades

Dentro de las comunidades de Pañacocha y Playas de Cuyabeno actualmente ya existen implementadas las redes HSPA+ de parte de la Corporación Nacional de

Telecomunicaciones CNT EP. El plan comercial que otorga la CNT EP a dichas comunidades se denomina Plan Prepago Preactivado Ciudad del Milenio. Este plan otorga planes de voz y datos a las mencionadas Comunidades (CNT EP, 2012).

Para la instalación de las redes móviles la empresa pública PETROAMAZONAS EP realizó la instalación de la red de fibra óptica que cruce el Campo de Explotación Petrolífera Pañacocha. Esta red cuya imagen se observa en la Figura 20 se encuentra ubicada dentro del Ducto Subterráneo Pañacocha tiene una longitud de 77 km y cruza los campos Petrolíferos de Pañacocha y Edén, es decir, que se tiene una red de fibra óptica entre los ríos Napo y Aguarico para que dispongan de Internet Banda Ancha Fija y Móvil las comunidades de Pañacocha, Playas de Cuyabeno y el campo petrolífero El Edén.



**Figura 20. Ruta del Ducto Pañacocha que atraviesa los campos petrolíferos de Pañacocha y El Edén**

**Fuente:** (Petroamazonas, 2011).

La Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT EP ha instalado una radiobase con tecnología HSPA+ dentro del Campo Petrolífero Bloque 12 de EPF perteneciente a la parroquia El Edén. La infraestructura utilizada para abastecer del servicio de datos móviles a los técnicos y demás profesionales que se encuentran trabajando en el Campamento se encuentra ubicado a 11 Km. de la Comunidad del Milenio de Pañacocha y a unos 30 Km. del Campamento Base Pañacocha. En la Figura 21 se puede observar la cobertura que posee el mencionado campamento.



**Figura 21. Cobertura de la Red HSPA+ de la CNT EP en el Campo Petrolífero Bloque 12 EPF**

**Fuente:** (CNT EP, 2014).

### **3.2. Análisis de la Banda de Frecuencias para las redes CDMA y LTE en el Ecuador**

El inicio de las redes móviles en el Ecuador tuvo sus orígenes a inicios de la década de los 90. El 14 de Junio de 1993 la Superintendencia de Telecomunicaciones SUPTTEL empezó las negociaciones con las empresas CONECEL cuyo nombre comercial era Porta Celular y OTECEL que se denominaba Celular Power quienes fueron las empresas pioneras en la ejecución y comercialización de las redes móviles

en el país. Estas empresas implementaron las redes análogas AMPS en la Banda A y la licitación para el funcionamiento de esas empresas tuvo una duración de 15 años. A finales del año de 1995 un total de 54.348 abonados (23.800 abonados de OTECEL y 30.548 abonados de CONECEL) (SUPERTEL, 2010).

Entre los años de 1996 y 1997 CONECEL y OTECEL migraron de tecnologías celulares hacia las redes TDMA dentro de la red de 800 MHz, a su vez que en el año 2001 estas empresas implementaron el servicio de mensajería de texto corto SMS. Las tecnologías AMPS/TDMA tuvieron su fin a mediados del año 2007 ya que la SUPTEL determinó que estas tecnologías no poseen la seguridad adecuada en la realización y ejecución de sus llamadas de voz por lo que el 30 de Septiembre de 2007 se finalizó la operación de estas redes en el país (Ecuador Inmediato, 2007)

Entre los años 2002 y 2003 las empresas CONECEL y OTECEL migraron de tecnologías a las redes de segunda generación. CONECEL realizó el lanzamiento de su red GSM la cual tuvo un gran impacto en el país debido a la mayor cobertura que tenía dicha red y en los meses siguientes se efectuó el lanzamiento del portador de datos GPRS con la tecnología 2.5G, la cual fue la red pionera dentro del servicio de datos móviles en el Ecuador.

OTECEL lanzó al mercado su red CDMA en el 2002 pero luego de la compra de parte de TELEFÓNICA MÓVIL de España en el año 2004 comenzaron muchos cambios en la empresa ya que el año 2005 se cambia de razón social al nombre de MOVISTAR a la vez que implementan la red GSM.

De aquí en adelante estas empresas empezaron con la ejecución y comercialización de las redes de segunda, tercera y cuarta generación que son las redes que están actualmente implementadas en el país basados en los estándares GSM, GRPS, EDGE, UTMS, HSDPA, HSPA y HSPA+. Todas estas tecnologías están basadas en el proyecto 3GPP.

### 3.2.1. Redes CDMA

OTECCEL empezó sus operaciones en la Red CDMA de 800 MHz en el año 2002. A finales del año 2003 se comenzó a operar dentro de la red CDMA2000 1X la cual permitía el acceso a las aplicaciones de Internet de baja velocidad como navegación y correo electrónico. Es decir, se implementaban de esa forma las primeras redes de navegación móvil en el Ecuador.

El 4 de Abril de 2003 el Estado otorgo la concesión del servicio de SMA (Servicio Móvil Avanzado) a la empresa TELECSA S.A. cuyo nombre comercial era Alegro PCS (actualmente es la Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT EP). Cabe destacar que la cláusula cuarta de la mencionada concesión se establece que la operadora móvil trabaje dentro de la banda de 1900 MHz mediante las sub-bandas C-C' (1895 – 1910 MHz y 1975 – 1990 MHz). En Diciembre del mismo año comenzó a operar en el país con su red CDMA 1X EVDO.

En el año 2006 las tres operadoras OTECEL, CONECEL y TELECSA S.A. mediante la resolución 453-19-CONATEL-2006 del Consejo Nacional de Telecomunicaciones CONATEL suscribieron el uso de las siguientes sub-bandas de frecuencias en la banda de 1900 MHz con el fin de mejorar el servicio móvil que prestan en el Ecuador en base a la Tabla 7.

**Tabla 7.**

#### **Asignaciones de las Sub-bandas referentes a la banda de 1900 MHz por parte de la CONATEL**

<i>Operadora</i>	<i>Banda</i>	<i>Ancho de Banda</i>
<b>OTECCEL S.A.</b>	Sub-banda D-D'	10 MHz
<b>CONECEL S.A.</b>	Sub-banda E-E'	10 MHz
<b>TELECSA S.A.</b>	Sub-banda F-F'	10 MHz

**Fuente:** (Asqui, 2010).

Las redes móviles que manejaban las operadoras fueron cambiando en base al mercado ecuatoriano. Es decir, los niveles de cobertura y el costo de instalación, operación y mantenimiento de dichas redes obligo a las empresas OTECEL y TELECSA a implementar las redes GSM dentro de sus plataformas de voz para competir con la empresa CONECEL quien se adueñó del mercado ecuatoriano al ofrecer dicho servicio.

OTECCEL instalo sus primeras radiobases con la tecnología GSM a inicios del 2005 y comenzó a operar en el Ecuador en Septiembre del mismo año. A su vez a finales del año 2007, la operadora TELECSA quien en un acuerdo con OTECEL al prestar su red de acceso de radio (RAN) mediante un operador móvil virtual (MVNO) (Asqui, 2010).

A continuación se presenta la Tabla 8 mediante la cual se observa el desarrollo de las redes de datos móviles en el Ecuador en base a las tecnologías mencionadas anteriormente.

La expansión de las telecomunicaciones se debe expandir no solo a nivel urbano, sino también a nivel rural. Mediante la resolución 009-03-CONATEL-2008 de 21 de Febrero de 2008, el CONATEL amplió la definición de las áreas urbano-marginales del Plan de Servicio Universal a los centros educativos públicos, centros estatales de atención médica, y a los organismos de desarrollo social sin fines de lucro, que no disponen de los servicios de telecomunicaciones definidos en dicho plan o que se consideren insuficientes (SUPERTEL, 2013).

Dentro de estos planes a ejecutar esta la tecnología CDMA450 la cual combina las prestaciones que dispone la red CDMA2000 1x dentro de esta banda de frecuencia.

**Tabla 8.****Tabla Comparativa de las Redes de Datos Móviles Instaladas en el Ecuador**

<i>Tecnología Celular</i>	<i>Downlink</i>		<i>Uplink</i>		<i>Operadora</i>	<i>Observaciones</i>
	<b>Peak Network Speed</b>	<b>Peak and/or Typical User Rate</b>	<b>Peak Network Speed</b>	<b>Peak and/or Typical User Rate</b>		
<b>EDGE</b>	236.8 Kb/s	70 – 135 Kb/s	236.8 Kb/s	70 – 135 Kb/s	CONECCEL OTECCEL	
<b>UTMS WCDMA Rel 99</b>	2.048 Mb/s		768 Kb/s		CONECCEL	3G Original de Conecel
<b>HSPA</b>	14.4 Mb/s		384 Kbps		CONECCEL	Evolución de Conecel a 3.5 G
<b>CDMA2000 1XRTT</b>	153 Kb/s		153 Kb/s	130 Kb/s peak	TELECSA OTECCEL	
<b>CDMA2000 EV-DO Rev 0</b>	2.4 Mb/s		153 Kb/s	150 Kb/s peak	TELECSA	3G

**Fuente:** (SUPERTEL, 2009).

Esta red tiene la misma arquitectura que la tecnología CDMA2000 pero ofrece diversas ventajas a diferencia de otras bandas de frecuencia tales como mayor cobertura, flexibilidad en el tamaño de la celda, mejor desempeño en entornos urbanos y rurales, tecnología establecida en el mercado de las telecomunicaciones y la facilidad de la concesión de licencias del espectro radioeléctrico ya que esta banda se encuentra disponible de radionavegación, servicios fijos y móviles dentro del Plan Nacional de Frecuencias. En la Tabla 9 se observa las bandas de frecuencia que están disponibles en el país con su respectivo servicio.

Las operadoras que trabajan con esta tecnología son TELECSA y ETAPA (Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca). La empresa ETAPA solicitó la asignación de frecuencias para la banda de frecuencias de 470 MHz a mediados de Octubre del año 2006, por lo que el CONATEL autoriza la concesión del servicio a la empresa ETAPA mediante la Resolución N°. 677-33-CONATEL-2006 suscrito el 16 de Enero de 2007.



Tabla 9.

## Plan Nacional de Frecuencias en el Rango de 450 – 470 MHz

<i>Rango desde 450MHz hasta 470MHz</i>	<i>Frecuencia Inicial – Frecuencia Final</i>
FIJO MÓVIL <b>Notas Nacionales:</b> <i>EQA.55</i> <i>EQA.60</i> <b>Notas Internacionales:</b> <i>ADD5.XXX</i>	450 MHz - 455 MHz
FIJO MÓVIL <b>Notas Nacionales:</b> <i>EQA.55</i> <i>EQA.60</i> <b>Notas Internacionales:</b> <i>5.286B</i> <i>5.286C</i> <i>ADD5.XXX</i>	455 MHz - 456 MHz
FIJO MÓVIL <b>Notas Nacionales:</b> <i>EQA.55</i> <i>EQA.60</i> <b>Notas Internacionales:</b> <i>ADD5.XXX</i>	456 MHz - 459 MHz
FIJO MÓVIL <b>Notas Nacionales:</b> <i>EQA.55</i> <i>EQA.60</i> <b>Notas Internacionales:</b> <i>5.XXX</i> <i>5.286B</i> <i>5.286C</i>	459 MHz - 460 MHz
FIJO MÓVIL <b>Notas Nacionales:</b> <i>EQA.55</i> <i>EQA.60</i> <i>EQA.140</i> <b>Notas Internacionales:</b> <i>ADD5.XXX</i> <i>5.289</i>	460 MHz - 470 MHz
FIJO MÓVIL <b>Notas Nacionales:</b> <i>EQA.55</i> <i>EQA.60</i> <i>EQA.140</i> <b>Notas Internacionales:</b> <i>MOD5.293</i>	470 MHz - 512 MHz

Fuente: (SENATEL, 2014).

Esta resolución permite que la empresa ETAPA opere dentro de la sub-banda de frecuencias F correspondiente a la banda de 450 MHz en la provincia del Azuay. Es decir que trabaja en las bandas de 479.000 – 483.480 MHz para la transmisión de la Estación Base y las bandas de 489.000 – 493.480 MHz (CONATEL, 2006).

Mediante la resolución 331-C-CONATEL-2008 del 23 de Junio de 2008, el CONATEL ejecuta lo siguiente “Realizar las acciones necesarias para la liberación de una parte de la sub-banda A de la red CDMA450 comprendida en los rangos 454.400 – 457.475 MHz y 464.400 – 467.475 MHz en las provincias en las cuales se tenga un número menor o igual a diez concesiones de frecuencias en dichos rangos. En aquellas provincias en las cuales se tenga un número mayor a diez concesiones, la SENATEL deberá verificar la disponibilidad del espectro para la reasignación de los concesionarios salientes y, además, el compromiso del operador entrante de indemnizar a dichos concesionarios. Todo esto con la finalidad de permitir la implementación de sistemas orientados a brindar servicios de telecomunicaciones fijos en áreas rurales”. Dentro de esta resolución se autoriza la operación de la sub-banda A de la banda de frecuencia de 450 MHz para su operación en el País (CONATEL, 2008).

De esta manera se han ejecutado proyectos de carácter social con el fin de ejecutar las redes CDMA 450 en las poblaciones rurales del Ecuador. Es así que el CONATEL mediante la Resolución 437-15-CONATEL-2009 califica al proyecto CDMA 450 de la CNT EP como proyecto de carácter social. A su vez el Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información MINTEL realiza los informes favorables para la ejecución de las redes CDMA 450 mediante el memorando N° SSI-DAU-033-09. La CONATEL por su parte aprueba la ejecución del proyecto CDMA 450 presentado por la CNT EP mediante la Resolución 030-01-CONATEL-2010 suscrito el 19 de Enero de 2010 (CONATEL, 2010).

Para la utilización de las sub-bandas A - A' en la banda de frecuencia de 450 MHz dentro del territorio nacional el CONATEL mediante la resolución TEL-886-23-CONATEL-2011 autoriza la operación de las sub-bandas A - A' de CDMA 450 a la CNT EP. Es así que la CNT EP tiene la exclusividad de la operación de las bandas A-A' para su ejecución a lo largo del territorio nacional, es decir, se ocupará la tercera portadora de la sub-banda A - A' en las siguientes provincias: Morona Santiago, Zamora Chinchipe, Loja, Cañar, Azuay, Bolívar, Imbabura, Carchi, Chimborazo, Napo, Pastaza, Manabí, Galápagos, Orellana y Sucumbíos. A su vez que se autoriza el uso de las tres portadoras en la misma sub-banda en las provincias de Guayas, Santa Elena, Los Ríos, El Oro, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Santo Domingo de los Tsáchilas y Esmeraldas (CONATEL, 2012).

En la Tabla 10 tenemos las bandas de frecuencia de transmisión de la sub-banda A para su ejecución en el proyecto CDMA 450 implementado por la CNT EP.

**Tabla 10.**

**Distribución de la Sub-Banda A-A' en la Banda de 450 MHz especificado según la canalización NMT-450**

SUB-BANDA	Bandas de Frecuencia de Transmisión (MHz)		Ancho de Banda (MHz)
	<i>Terminal Móvil</i>	<i>Estación Base</i>	
A – A'	452.500 – 457.475	462.500 – 467.475	4,957 x 2

**Fuente:** (Ministerio de Telecomunicaciones de la República de Colombia, 2007).

Dentro de la operación y funcionamiento de las redes CDMA en el Ecuador podemos mencionar que el 31 de Diciembre de 2011 la empresa OTECEL decide finalizar las operaciones de su red CDMA en la banda de 800 MHz, esta decisión se ejecutó con el fin de promover y optimizar las tecnologías basadas en las especificaciones 3GPP como las redes GSM y HSPA+. Los usuarios que disponían

de los dispositivos con tecnología CDMA realizaron el cambio de tecnología a las redes GSM/UTMS/HSPA. En total existieron 24.241 usuarios que pertenecían a la red CDMA (SUPERTEL, 2011).

### **3.2.2. Redes LTE**

TELECSA S.A. realizó la transición de una entidad anónima a una empresa pública el 14 de Enero de 2010 mediante decreto ejecutivo N°. 218, publicado en el registro oficial 122 mediante el cual se cambia de nombre denominándose de esa forma la CNT EP (Corporación Nacional de Telecomunicaciones Empresa Pública). Esta transición no solo permitió un cambio estructural de la empresa ya que se implementaron las tecnologías de tercera generación 3G WCDMA mediante los convenios suscritos con las empresas Huawei y Alcatel-Lucent para la provisión de infraestructura a mediados del año 2010.

En el mes de Junio de 2011, la CNT EP ejecuta la provisión e implementación de las redes de cuarta generación HSPA+ mediante el contrato suscrito a las empresas Huawei y Alcantel-Lucent. Esta inversión tiene un costo aproximado a los USD 72 millones. Cabe destacar que la nueva red HSPA+ permitirá la escalabilidad a la red LTE dentro de todo el territorio nacional. Cabe destacar que la red que tiene implementado la CNT EP tiene habilitado la tecnología HSUPA Fase 2, el cual permite subir los archivos de nuestro dispositivo móvil a la red (Uplink) a una velocidad teórica de 5.76 Mbps. Sin embargo, dentro de los planes comerciales que ofrece la CNT EP con HSPA+ otorga una velocidad de subida de máximo 2 Mbps (CNT EP, 2011).

Como parte inicial de las operaciones de la red LTE en el Ecuador el CONATEL resolvió adoptar el 18 de Octubre de 2012 el plan de bandas de frecuencia del esquema de canalización de la Telecomunidad Asia Pacífico (APT) para la banda de

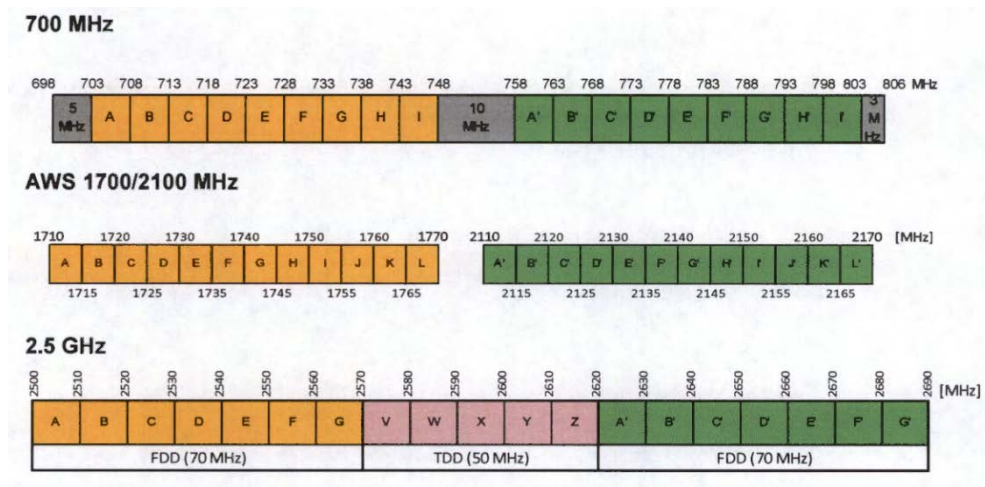


**Tabla 11.****Cuadro de Atribuciones del Plan Nacional de Frecuencias modificado por el CONATEL para el uso de la tecnología LTE 700 MHz**

<i>Rango de Frecuencias (MHz)</i>	<i>Atribución</i>	<i>Notas</i>
<b>698 - 806</b>	MÓVIL Fijo	EQA.85: En las bandas 698 – 806 MHz, 824 – 849 MHz, 869 – 894 MHz, 1710 – 2025 MHz y 2110 – 2200 MHz, operan sistemas IMT (International Mobile Telecommunications) para los servicios FIJO y MOVIL. Los sistemas de audio y video por suscripción bajo la modalidad de televisión codificada terrestre (UHF codificado) concesionados en la banda 698 – 806 MHz, podrán continuar su operación hasta la vigencia de su contrato de concesión.

**Fuente:** (CONATEL, 2012).

Sin embargo, la única empresa autorizada para ejecutar las redes LTE en el Ecuador en la actualidad es la CNT EP ya que dentro de la resolución anteriormente descrita se autoriza el uso de las bandas de 700 MHz en los bloques G – G', H – H' e I – I' correspondientes a los rangos 733 – 748 MHz (Uplink) y 788 – 803 MHz (Downlink) lo que equivale a un ancho de banda de 15 MHz para los dos enlaces y la banda AWS de 1700/2100 MHz en los bloques A – A', B – B', C – C' y D – D' correspondientes a los rangos 1710 – 1730 MHz (Uplink) y 2110 – 2130 MHz (Downlink) a nivel nacional pero teniendo en cuenta que estas frecuencias deben encontrarse libres ya que actualmente se encuentran operativas los servicios de Televisión Codificada Terrestre (Canales del 50 al 69). Se espera el pronunciamiento de la CONATEL para la adjudicación del espectro radioeléctrico a las demás operadoras móviles. En la Figura 23 se observa las canalizaciones de las bandas de frecuencias adoptadas en el Ecuador para su utilización en las redes LTE 4G.



**Figura 23. Canalización de las bandas de frecuencia de 700 MHz, AWS 1700/2100 MHz y 2500 MHz adoptado por el CONATEL**

**Fuente:** (CONATEL, 2013).

### 3.3. Redes CDMA 450 MHz y LTE desarrolladas en el Ecuador

#### 3.3.1. Red CDMA 450 MHz de la empresa ETAPA

La empresa ETAPA al ser una empresa pública que depende de la Alcaldía de Cuenca emplea sus servicios de telecomunicaciones a lo largo de la ciudad de Cuenca y sus alrededores. Los servicios que ofrece ETAPA a sus usuarios mediante las redes CDMA 450 es la Telefonía Fija Inalámbrica el cual permite que a través de la cobertura ofrecida por la red CDMA 450 el usuario disponga de los mismos servicios y costos que tiene en la telefonía fija sin tener que estar conectado a una red de telefonía fija.

La empresa ETAPA plantea cubrir las 21 parroquias rurales del Cantón Cuenca dentro de su red CDMA 450 ya que actualmente posee cobertura total dentro de las 15 parroquias urbanas de la Ciudad de Cuenca. En la Tabla 12 podemos observar la cobertura que posee la empresa ETAPA en 17 parroquias rurales de Cuenca.

**Tabla 12.**

**Cobertura de la red CDMA de ETAPA en las parroquias rurales de Cuenca asociadas a su respectiva celda**

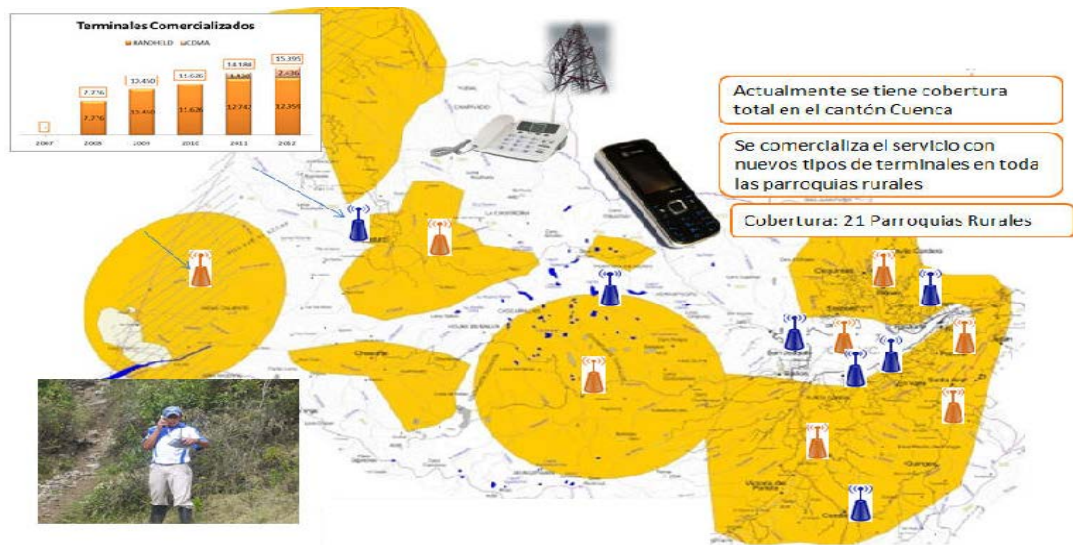
<i>Celda</i>	<i>Parroquia</i>
<b>Tucurumi</b>	Tarqui
	Victoria del Portete
	Cumbe
<b>Dizha</b>	Turi
	Santa Ana
	Quingueo
<b>Gualguazhumi</b>	El Valle 1
	Llacao
	Paccha
	Nulti
	Ricaurte
<b>Bibin</b>	El Valle 2
	Checa
	Chiquintad
	Octavio Cordero Palacios
<b>Soldados</b>	Sidcay
	Sinincay
	San Joaquín

**Fuente:** (ETAPA, 2014).

Sin embargo, en el año 2010 se han instalado 4 Radio Bases CDMA que cubrirán las parroquias de Sinincay, San Joaquín, Sayausí, Baños, Chaucha y Molleturo. Para este proyecto se implementaron un total de 1500 líneas telefónicas. En la Figura 24 podemos observar en el Mapa de la Ciudad de Cuenca la cobertura existente dentro de la tecnología CDMA 450.

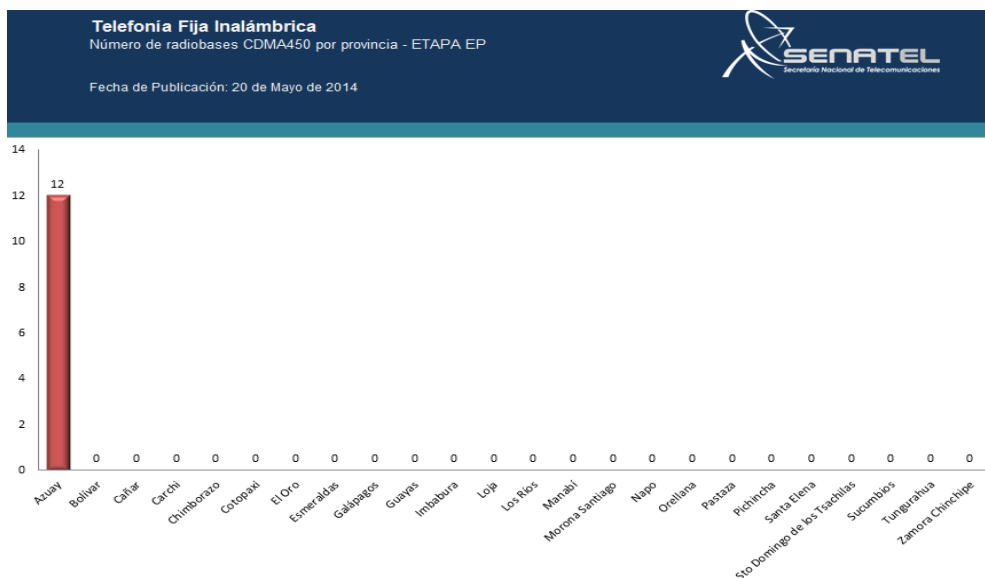
La SENATEL mediante su estadística empleada a nivel de operadores y la distribución de las radiobases en el Ecuador nos muestra que existen actualmente 12 Radiobases instaladas en la provincia del Azuay por la empresa ETAPA como se muestra en la Figura 25.





**Figura 24. Mapa de la Cobertura de la Red CDMA 450 de la empresa ETAPA en el Cantón Cuenca**

**Fuente: (ETAPA, 2014).**



**Figura 25. Gráfico Comparativo de la SENATEL que muestra la distribución y el número de radiobases instalados por la empresa ETAPA en la red CDMA 450**

**Fuente: (SENATEL, 2014).**

### 3.3.2. Red CDMA 450 MHz de la Empresa CNT EP

Dentro de los planes que ejecuta el Gobierno Nacional en todas las poblaciones del país con el fin de que toda la población disponga de los servicios de telecomunicaciones la CNT ha ejecutado su red de Telefonía Rural Inalámbrica mediante la tecnología CDMA 450 MHz a lo largo de todo el país. Mediante esta tecnología se puede ofrecer los servicios de voz y datos a baja velocidad.

Para cubrir todas las poblaciones rurales donde no existe ninguna red de telecomunicaciones la CNT ha dividido su proyecto CDMA 450 en tres fases mediante las cuales se pretende dotar del servicio de voz a las poblaciones más recónditas de nuestro país. En la Tabla 13 se observa cómo se encuentran divididas las fases de ejecución del proyecto CDMA 450.

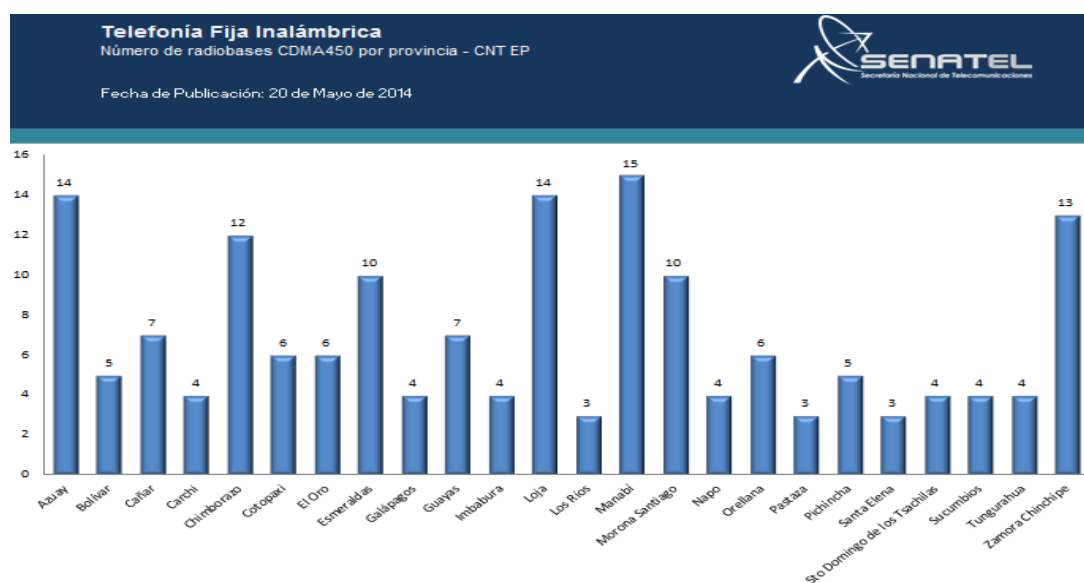
**Tabla 13.**

#### División de las 3 Fases del Proyecto CDMA 450 MHz de la CNT EP

Proyecto CDMA 450 MHz de la CNT EP	
<i>Fase</i>	<i>Provincias</i>
Fase 1 (5 Provincias) Región Austro – Oriental	Cañar Azuay Loja Morona Santiago Zamora Chinchipe
Fase 2 (15 Provincias)	Carchi Imbabura Chimborazo Bolívar Sucumbíos Orellana Napo Pastaza Manabí Galápagos Azuay Cañar Loja Morona Santiago Zamora Chinchipe
Fase 3	24 Provincias del Ecuador

**Fuente:** (ITU, 2009).

Actualmente la CNT EP dispone de un total de 167 radiobases instaladas a lo largo de todo el país, las cuales disponen de la tecnología CDMA 450 y su cobertura se extiende en casi todas las poblaciones rurales de cada provincia. La distribución de las radiobases en las diferentes provincias del Ecuador y su cobertura las podemos apreciar en la Figura 26 y la Figura 27.

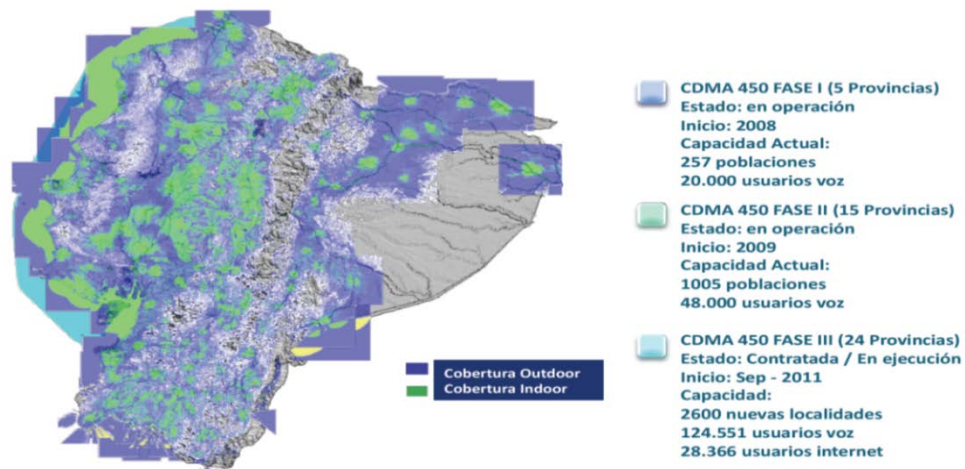


**Figura 26. Distribución por provincias de las radiobases instaladas con tecnología CDMA 450 MHz de la CNT EP**

**Fuente:** (SENATEL, 2014).

### 3.3.3. Red LTE 1700 MHz de la Empresa CNT EP

El 17 de Octubre de 2013 la CNT EP realiza la presentación de su red de cuarta generación LTE para lo cual se plantea una inversión inicial de USD 36 millones. Se tiene previsto instalar 400 radiobases en las principales ciudades del Ecuador como son Quito, Guayaquil, Cuenca, Machala y Loja. En el mes de Diciembre del mismo año se comienza a ofrecer las redes LTE tanto en planes prepago como planes postpago.



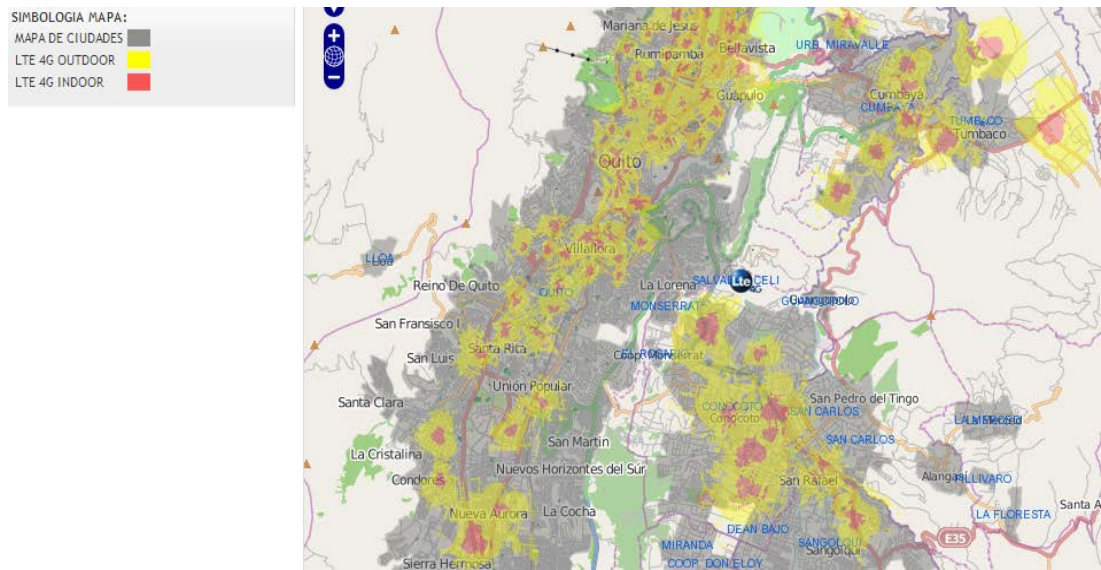
**Figura 27. Mapa Físico del Ecuador Continental que muestra la cobertura de la red CDMA 450 MHz otorgada por la CNT EP**

**Fuente:** (EEQ, 2012).

Actualmente no se ofrece el servicio móvil LTE a través de los dispositivos móviles inteligentes o smartphones, sino que se lo realiza mediante la conexión de un Router WiFi LTE Huawei MiFi LTE E5776 el cual permite la conexión de hasta 5 dispositivos con una velocidad máxima de 20 Mbps de Downlink y 2 Mbps de Uplink (CNT EP, 2013).

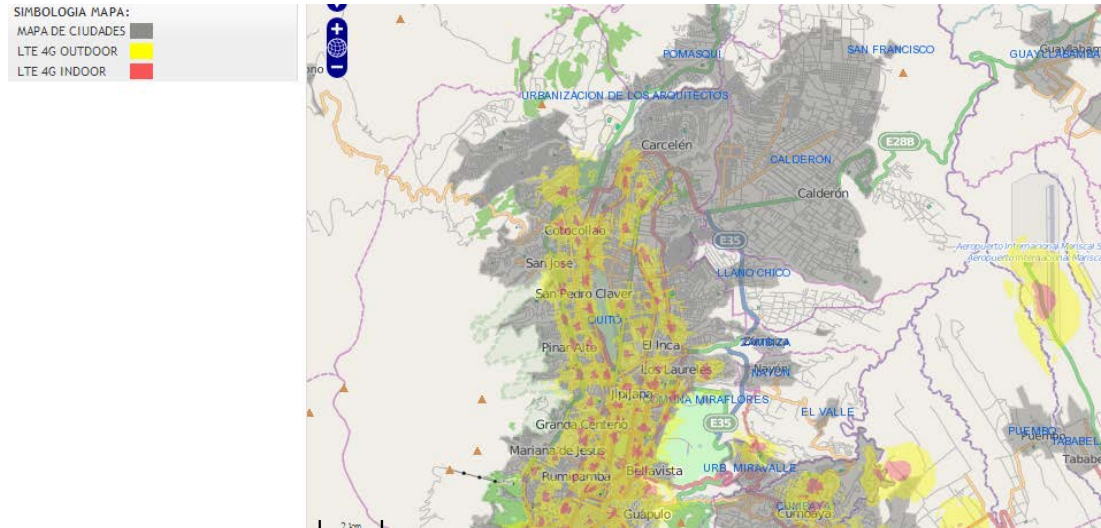
La cobertura de la red LTE actualmente se extiende a lo largo de las zonas urbanas de las ciudades de Quito y Guayaquil como podemos apreciar en las Figuras 28, 29, 30, 31 y 32.

El día 09 de Junio de 2014 en el enlace ciudadano realizado en el Cantón Carlos Julio Arosemena de la provincia de Napo, el Presidente de la República Econ. Rafael Correa anunció el inicio de las negociaciones para la concesión de las frecuencias que permitirán a las demás operadoras móviles desplegar las redes LTE 4G. Las bandas de frecuencia disponibles son: 700 MHz, 1900 MHz, 1700-2100 MHz y 2500 MHz (SENATEL, 2014).



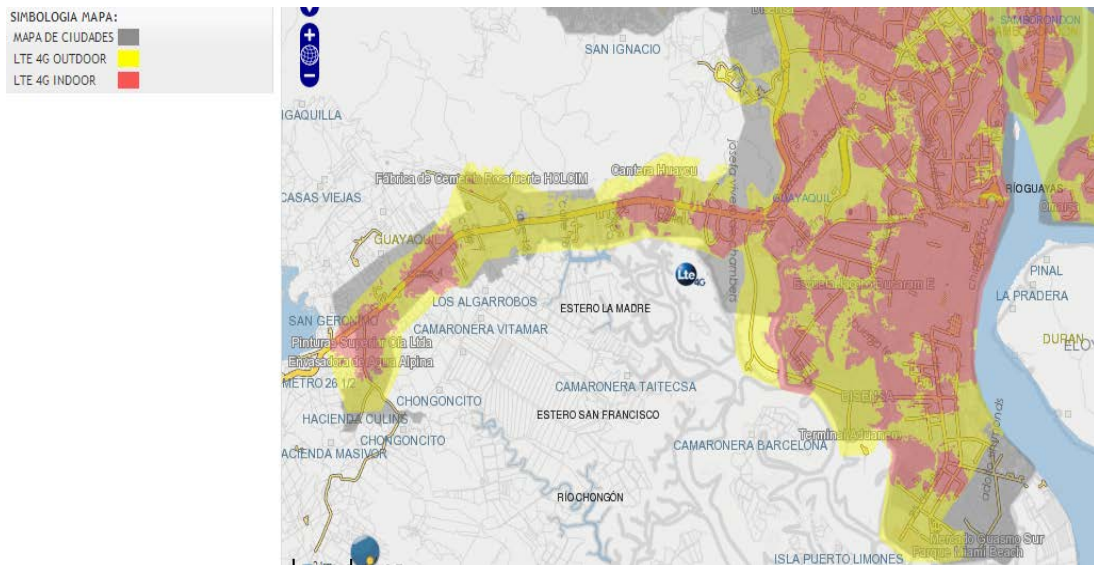
**Figura 28. Cobertura de la Red LTE 4G de la CNT EP en los sectores Sur y Centro de la Ciudad de Quito y los valles de Cumbaya y Tumbaco**

**Fuente:** (CNT EP, 2014).



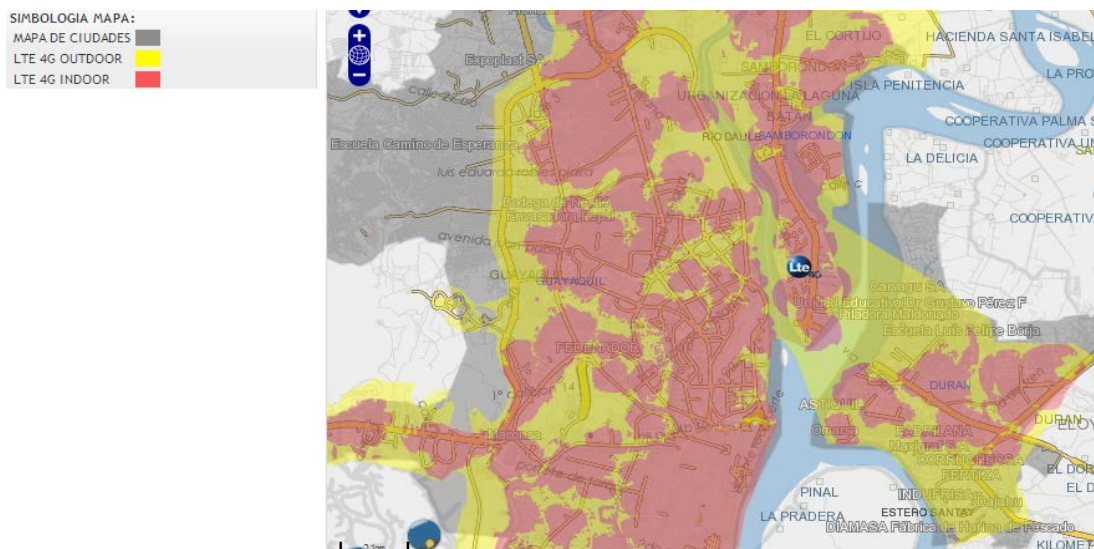
**Figura 29. Cobertura de la Red LTE 4G de la CNT EP en el sector Norte de Quito**

**Fuente:** (CNT EP, 2014).



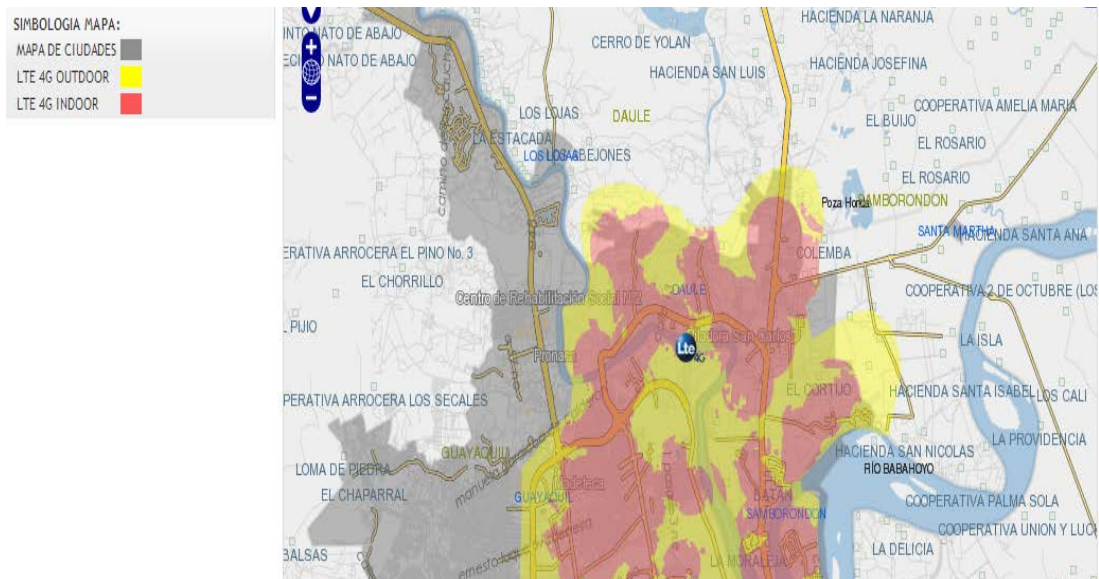
**Figura 30. Cobertura de la Red LTE 4G de la CNT EP en el Sector Sur Oeste de Guayaquil**

**Fuente:** (CNT EP, 2014).



**Figura 31. Cobertura de la Red LTE 4G de la CNT EP en el Sector Centro de Guayaquil y en Duran**

**Fuente:** (CNT EP, 2014).



**Figura 32. Cobertura de la Red LTE 4G de la CNT EP en el Sector Norte de Guayaquil**

**Fuente:** (CNT EP, 2014).

## **CAPÍTULO IV**

### **DISEÑO DE LAS REDES INALÁMBRICAS CDMA 450 MHZ Y LTE 700 MHZ EN LAS COMUNIDADES DEL MILENIO**

#### **4.1. Cobertura**

Dentro de los lineamientos que se requiere en la planificación de redes celulares se debe realizar en primer lugar el estudio de la cobertura que se va a disponer en las áreas donde desarrollemos nuestras redes.

Un análisis exacto de cobertura y capacidad en las redes CDMA2000 permite diseñar una red estable tanto en los servicios de voz y datos que se desea ofrecer, por lo cual requiere herramientas o programas especializados que permitan obtener una simulación del comportamiento de las redes móviles tanto en el desempeño de sus radioenlaces como en la distribución de tráfico. Sin embargo, al analizar el sistema bajo ciertos parámetros de propagación de tráfico se puede establecer de manera razonablemente y con gran precisión las estimaciones del rendimiento de la red. Estos cálculos y los términos de rendimiento que se van a establecer son muy útiles para entender las consideraciones importantes del diseño y la planificación de las redes móviles.

Para el análisis de la cobertura en las redes CDMA y LTE se utilizó la herramienta de planificación radioeléctrica SIRENET (Simulation of RadioElectric NETWORKs) que es una aplicación informática que facilita la planificación y gestión de los radioenlaces.



SIRENET se basa en la simulación de entornos reales apoyándose en un avanzado sistema de información geográfica, en la forma del comportamiento de los equipos radioeléctricos y en los algoritmos más avanzados y actuales para la predicción de la propagación en distintos entornos. La aplicación presenta un entorno de trabajo amigable sobre plataforma Windows. El manejo es simple e intuitivo y su funcionalidad se adapta a las necesidades de distintos perfiles de usuario.

Este programa es ideal tanto para supervisar las redes ya en servicio como para planificar las que se vayan a desplegar en el futuro. Sus algoritmos cubren todas las bandas y servicios de la radiocomunicación, incluyendo LTE, UMTS, GSM, DVB-T, DVB-T2, ISDB-T, ATSC, TV, DAB, FM, TETRA, APCO, IDEN, DECT, Punto-Multipunto, WiMAX, WIFI, etc. Los requerimientos mínimos técnicos aconsejables para su operación son los siguientes:

- Sistema Operativo Windows 2000, NT, XP SP2, Vista, 7 u 8.
- Procesador Intel o AMD Dual Core
- 640 MB de Disco Duro para su instalación
- Memoria RAM de 1 GB
- Tarjeta de Video de 256 MB (APTICA, 2013)

Para el análisis de cobertura en el programa SIRENET y para el cálculo del enlace y el dimensionamiento de la red requerimos de modelos de propagación de los enlaces radioeléctricos que permitan estimar la propagación de las ondas en el espacio mediante distintas metodologías. Estos métodos se dividen en: empíricos, determinísticos y mixtos.

Los métodos determinísticos se basan en la teórica óptica geométrica y tienen en cuenta básicamente los efectos de difracción y reflexión de los rayos sobre el terreno. Su empleo es apropiado cuando se dispone de cartografía adecuada para simular

correctamente la orografía del terreno. Entre los métodos determinísticos más comunes tenemos los siguientes:

- Rec. UIT-R P.526 y 526-10
- Deygout
- Línea de Vista
- Difracción Urbana
- Rec. UIT-R P.452
- Rec. UIT-R P.1812
- Rec. IUT-R P.530

Los métodos empíricos están basados en exhaustivas campañas de medidas, realizadas sobre determinadas situaciones canónicas, en las que la estaciones emisoras y receptoras presentan unas determinadas condiciones respecto al terreno. De este conjunto de medidas discretas se genera posteriormente un catálogo de curvas que permite extrapolar valores de propagación para un determinado rango de frecuencias, alturas de antenas, distancias, etc.

El empleo de este tipo de métodos es muy recomendable cuando no se dispone de información cartográfica de calidad o para simulaciones de propagación por dispersión troposférica, en aquellos casos en que distancias excesivas hacen inexactos los métodos determinísticos. Aquí tenemos algunos ejemplos de los métodos determinísticos:

- Rec. UIT-R P.370
- Rec. UIT-R P.1546
- Okumura - Hata
- COST 231 – Hata
- SUI
- Curvas de Superficie

- Deygout

Los métodos mixtos resultan un término medio entre los anteriores. En realidad están basados en algún método estándar pero introducen una serie de correcciones en función de medidas realizadas y/o del conocimiento de la ubicación de los terminales respecto a los obstáculos del trayecto. El hecho, por ejemplo, de aplicar una corrección de clutter (ruido provocado por ecos o reflexiones ajenos al sistema), debida al entorno del receptor, sobre los resultados de cualquiera de los métodos anteriores ya supone el empleo de un método de propagación mixto. Dentro de los métodos mixtos tenemos los siguientes:

- Xia-Bertoni
- COST 231
- Rec. UIT-R P.1411
- Okumura-Hata modulado

Para el presente proyecto vamos a utilizar los métodos de Okumura – Hata y de Deygout que son los métodos más utilizados en la predicción de los enlaces en entornos rurales y para el servicio móvil.

### **Método de Okumura – Hata**

La mayoría de las herramientas de propagación utiliza la variación del modelo de Hata. Este modelo es un método empírico el cual se deriva del reporte técnico realizado por Okumura el cual puede ser de gran utilidad en las herramientas de simulación. Okumura publicó uno de los modelos más utilizados para la predicción de la pérdida de propagación en áreas urbanas. El principal resultado del trabajo de Okumura fue un conjunto de curvas que proporcionan el nivel de atenuación media relativa al espacio libre, en función de la frecuencia, la distancia entre transmisor y receptor, la altura de las antenas de la estación base y la estación móvil, además de

varios factores de corrección específicos para diferentes tipos de trayecto (Aptica, 2010).

Con el objetivo de hacer que este método fuera más fácil de aplicar, Hata estableció una serie de relaciones numéricas que describen el método gráfico propuesto por Okumura. Dichas expresiones de carácter empírico, son conocidas bajo el nombre de modelo de Okumura-Hata, también llamado modelo de Hata.

El principal resultado que proporciona el modelo es el valor mediano de la pérdida básica de propagación, en función de la frecuencia, la distancia, y las alturas de las antenas de la estación base y el móvil.

El modelo de Okumura-Hata está restringido a los siguientes límites:

- $f$ : frecuencia en la gama  $150 \leq f \leq 1500 \text{ MHz}$
- $h_b$ : Altura efectiva de la antena transmisora, en la gama  $30 \leq h_b \leq 200 \text{ m}$
- $h_m$ : altura sobre el suelo de la antena receptora, en la gama  $1 \leq h_m \leq 10 \text{ m}$
- $d$ : distancia (km)

El modelo de Okumura – Hata expresa la pérdida de propagación básica  $L_b$  mediante la ecuación 1:

$$L_b = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log d \quad (1)$$

Donde  $a(h_m)$  es un factor de corrección que depende de la altura del móvil y que se calcula como sigue:

1. Para áreas urbanas:

a. Para ciudades pequeñas y medianas por la ecuación 2:

$$a(h_m) = (1.1 \log f - 0.7)h_m - (1.56 \log f - 0.8) \quad (2)$$

b. Para ciudades grandes mediante las ecuaciones 3 y 4:

$$a(h_m) = \begin{cases} 8.29(\log 1.54 h_m)^2 - 1.1 & f \leq 200MHz \\ 3.2(\log 11.75 h_m)^2 - 4.97 & f \geq 400MHz \end{cases} \quad (3)$$

$$(4)$$

2. Para áreas suburbanas mediante la ecuación 5:

$$L_b = L_b(\text{urbano}) - 2 \left[ \log \left( \frac{f^2}{28} \right) - 5.4 \right] \quad (5)$$

3. Para áreas rurales por la ecuación 6:

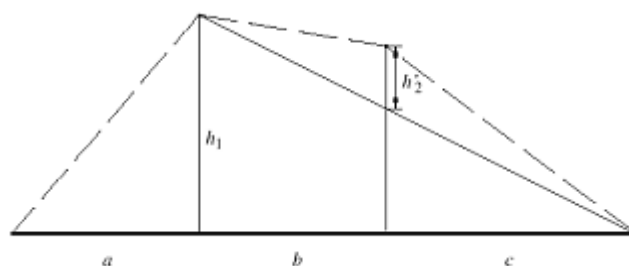
$$L_b = L_b(\text{urbano}) - 4.78(\log f)^2 + 18.33 \log f - 40.94 \quad (6)$$

Este método otorga buenos resultados en entornos urbanos y suburbanos, pero no así en áreas rurales, ya que no se toma en cuenta la ondulación del terreno ni los efectos derivados del grado de urbanización a lo largo del trayecto.

### **Método de Deygout**

Es el modelo de difracción propuesto por Jacques Deygout para el caso de ciertas circunstancias no contempladas en el modelo original. Se supone que la difracción es del tipo "filo de cuchillo" y los métodos se generalizan para el caso de cualquier número de obstáculos por medio de la utilización de un algoritmo recursivo.

Para analizar el efecto de la difracción debida a cualquier número de obstáculos se identifica en primer lugar el polígono funicular existente entre el transmisor y el receptor. Se determina un segmento de este polígono por dos obstáculos dominantes consecutivos como se puede observar en la Figura 33. Se debe resaltar que, entre estos obstáculos, pueden existir otros no dominantes, que deben tenerse en cuenta porque, a pesar de no interceder en el rayo directo del polígono funicular, penetran en el volumen de la primera zona de Fresnel.



**Figura 33. Método del Arista Dominante**

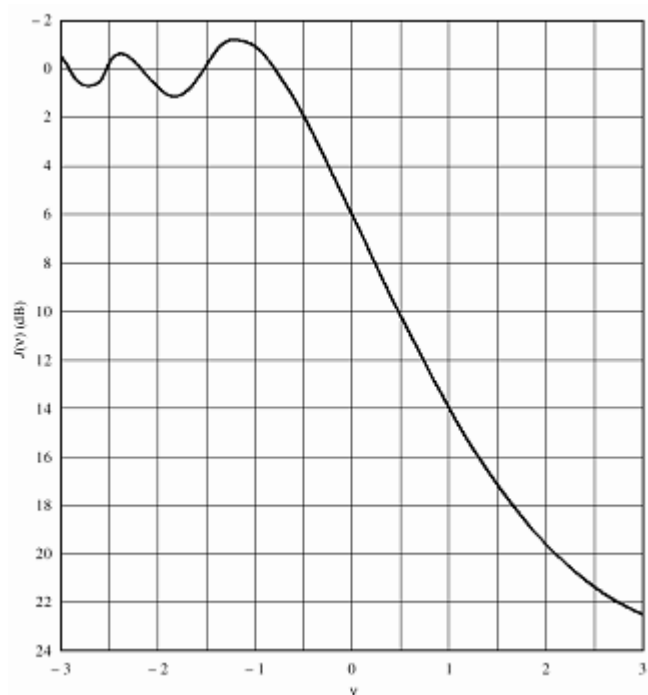
**Fuente:** (Aptica, 2010).

En este momento se identifica el obstáculo más dominante en el vano transmisor-receptor aquel para el que la variable de difracción, denominada  $V_p$  en este caso, toma el valor más alto. Se calcula las pérdidas por difracción  $J(V_p)$ , asumiendo que fuera el único obstáculo a lo largo del trayecto.

Si el obstáculo bloquea el rayo ( $V_p > 0$ ), se definen dos subtrayectos, entre los dos extremos del trayecto principal y el obstáculo. Para cada uno de ellos se identifica el obstáculo principal, con variable de difracción  $V_t$  y  $V_r$ , calculando a continuación las pérdidas por difracción que produce cada uno de estos obstáculos  $J(V_t)$  y  $J(V_r)$ , en el subtrayecto en que está ubicado (Aptica, 2010).

Para tener en cuenta el resto de obstáculos, se aplica el algoritmo recursivamente para cada uno de los dos vanos divididos por los obstáculos dominantes, por ejemplo del transmisor al obstáculo dominante y del obstáculo dominante al receptor. El algoritmo se detiene cuando el sub-enlace final presenta un despejamiento total (sin ninguna pérdida) o, los obstáculos invaden la primera zona de Fresnel pero no interceptan con el rayo directo. En el último caso, se utiliza el método llamado EMP, donde la pérdida total en el sub-vano se calcula como la suma de las contribuciones individuales de cada uno de los obstáculos, asumiendo que son los únicos que existen

como en el caso de un único obstáculo tipo filo de cuchillo como se observa en la Figura 34.



**Figura 34. Pérdidas por Difracción por Filo de Cuchillo**

**Fuente:** (Aptica, 2010).

Este método resulta ser muy práctico y fiable en el cálculo de otro tipo de pérdidas tales como reflexiones, absorción por lluvia y gases, despolarización, o variaciones refractivas. En cada uno de los casos utiliza fórmulas relevantes para cada modo de propagación (Aptica, 2010).

#### **4.1.1. Cálculo del Link Budget**

El Link Budget (Presupuesto del Enlace) determina la pérdida del enlace máximo permitido (MAPL - Maximum Allowable Path Loss) para un enlace de

radiocomunicaciones móviles. Este análisis se lo realiza tanto a nivel del enlace ascendente como descendente.

### **Link Budget del Enlace Ascendente para la red CDMA**

En el lado del transmisor debemos empezar con el cálculo de la Potencia Radiada Isotrópica Efectiva (EIRP) de la estación móvil que es la potencia de entrada efectiva para una antena isotrópica hipotética. Se calcula en función de la potencia de transmisión de la estación móvil, la ganancia de la antena de transmisión y las pérdidas en el cable y la relación del canal de tráfico (Traffic Channel Ratio) como se puede visualizar en la ecuación 7.

$$EIRP_{MS} = P_{TX_{MS}} + G_{MS} - L_{MS} + TCHR \quad (7)$$

Para los terminales móviles se debe de tomar en cuenta que las pérdidas en el cable son igual a cero. Sin embargo, para terminales fijos en los cuales se va a utilizar el servicio de voz y datos en CDMA 450 MHz, es decir en terminales donde se ocupará la telefonía fija inalámbrica se ocupará una ganancia de 2.1 dB por su antena incorporada. Por lo que resultaría el cálculo del EIRP mediante la ecuación 8.

$$EIRP_{MS} = P_{TX_{MS}} + 2.1dB + TCHR \quad (8)$$

Según las especificaciones del estándar TIA-856 y las redes CDMA2000 1x EV-DO Rev. 0 y Rev. A la potencia máxima de transmisión del terminal de usuario es de 200 mW, es decir al obtener su valor logarítmico será de 23 dB.

#### *Ganancia del Canal de Tráfico (Data Gain)*

La ganancia de canal de tráfico depende de la velocidad de datos utilizada. En la Tabla 14 se muestra los valores que son típicos tanto para EV-DO Rev. 0 y Rev. A.



**Tabla 14.**

**Valores de la Ganancia del Canal de Tráfico para diferentes calores de velocidad de datos**

<i>Velocidad de Datos (bps)</i>	<i>Data Gain (dB)</i>
<b>9600</b>	3.75
<b>19200</b>	6.75
<b>38400</b>	9.75
<b>76800</b>	13
<b>153600</b>	16.5
<b>230400</b>	18.75
<b>307200</b>	20
<b>1228000</b>	26
<b>1843200</b>	28.3

**Fuente:** (CDMA University, 2010).

*Traffic Channel Ratio (TCHR)*

Esta relación es la fracción de la energía de la señal de transmisión total asignado al canal de tráfico durante una ranura en la que se transmite el canal de tráfico. Esto se ve afectado por el poder de los diferentes canales: DRC o Digital Rate Control (DRCGain), DSC o Digital Source Channel (DSCGain), RRI o Reverse Rate Indicator (RRIGain) y RL\_ACK (ACKGain). La ecuación 9 nos ayudará a determinar este parámetro:

$$TCHR = DataGain - 10 \log \left( 1 + 10^{\frac{DataGain}{10}} + 10^{\frac{DRCGain}{10}} + 10^{\frac{RRIGain}{10}} + 10^{\frac{DSCGain}{10}} + 10^{\frac{ACKGain}{10}} \right) \quad (9)$$

Los valores que se van a utilizar para las ganancias DRCGain, DSCGain, RRIGain y ACKGain mediante el estándar TIA-856 se expresan en la Tabla 15.

Para el cálculo del Link Budget en las redes CDMA se va a tomar en cuenta los servicios de voz y datos ya que operan a distintas velocidades. La red de voz ocupará el códec EVRC-B con una tasa de datos de 9.6 kbps y la red de datos tendrá una velocidad máxima de 153.6 kbps con una modulación BPSK.

**Tabla 15.**

**Valores de las ganancias para el cálculo del Traffic Channel Ratio.**

<i>DRCGain</i>	-3.0 dB (soft handoff)
<i>DSCGain</i>	-9.0 dB
<i>RRI Gain</i>	-6.0 dB
<i>ACKGain</i>	+3.0 dB

**Fuente:** (QUALCOMM, 2003)

Tomando estas consideraciones el TCHR de las redes de datos y voz y con la potencia máxima de transmisión se realiza el cálculo de la Potencia Máxima de Transmisión de la Estación Móvil como se observa en la Tabla 16.

**Tabla 16.**

**Cálculo de la Potencia Máxima de Transmisión con los parámetros del canal.**

<b>Cálculo Potencia Máxima de TX del Canal</b>	<b>Unidades</b>	<b>CDMA2000 1x Voz 9.6 Kbps</b>	<b>1x EV-DO Rev. 0 153.6 kbps</b>	<b>Ecuación</b>
<i>Potencia Máxima de TX de la Estación Móvil</i>	dBm	23.0103	23.0103	A
<i>Ganancia del Canal de Tráfico</i>	dB	3.75	16.5	
<i>DRCGain</i>	-dB	-	-3.0	
<i>DSCGain</i>	dB	-	-	
<i>RRI Gain</i>	dB	-	-	
<i>ACKGain</i>	dB	-	3.0	
<i>Traffic Channel Ratio</i>	dB	-1.52807	-0.5040	9
<i>Potencia Máxima de Tx de la Estación Móvil con los parámetros del Canal</i>	dBm	21.48223	22.5063	B=A+(9)

Sin embargo, al utilizar la tecnología CDMA2000 1x EV-DO Rel. 0 solo utilizaremos las ganancias  $DRCGain$  y  $ACKGain$  ya que estas ganancias solo están presentes dentro de la subcapa MAC. De esa manera podemos obtener todos los parámetros en el lado del transmisor para calcular el EIRP tanto para el servicio de voz y datos como se observa en la Tabla 17 incluyendo las ganancias de las antenas.

**Tabla 17.**

**Cálculo del EIRP en el Transmisor para el Link Budget CDMA Reverse Link.**

Cálculo de EIRP	Unidades	CDMA2000 1x Voz 9.6 Kbps	1x EV-DO Rev. 0 153.6 kbps	Ecuación
<i>Potencia Máxima de Transmisión de la Estación Móvil</i>	dBm	23.0103	23.0103	
<i>Traffic Channel Ratio</i>	dB	-1.52807	-0.5040	
<i>Potencia Máxima de Tx de la Estación Móvil con los parámetros del Canal</i>	dBm	21.48223	22.5063	C
<i>Ganancia de la Antena</i>	dB	2.1 dB	2.1 dB	D
<i>EIRP<sub>Estación Móvil</sub></i>	dBm	23.58223	24.8491	E=C+D

*Densidad Espectral de Potencia de Ruido Térmico*

La densidad espectral de ruido térmico es el ruido natural causado por el movimiento Browniano de los electrones en el receptor y cuya resolución se puede verificar en la ecuación 10.

$$N_o = kT \rightarrow N_{o[dB]} = 10 \log K + 10 \log T = -174.0 \frac{dBm}{Hz} \quad (10)$$

Dónde:

$$k = \text{Constante de Boltzmann} = 1.380658 \times 10^{-23} \text{ Joules/Kelvin}$$

$$T = \text{Temperatura en Kelvin} = 290 \text{ }^\circ\text{K} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$$

La planta de ruido térmico (Thermic Noise Floor) se suele calcular teniendo en cuenta el ancho de banda extendido. Para ser coherente, el ruido en el ancho de banda de la señal  $B_o = 1.22880 \text{ MHz}$  se calculó para voz y para EV-DO.

La *figura del ruido* (NF) del receptor es la cantidad de ruido (en dB) que se añade al enlace de recepción por la ganancia en el amplificador de bajo nivel de ruido de la estación base. Un valor promedio para la figura de ruido es de 5 dB, aunque varía dependiendo del fabricante. No se toma en cuenta el Amplificador de la Torre Instalada.

*Relación de la Energía del Canal de Tráfico sobre la Densidad de Potencia de Ruido Térmico*

Esta relación  $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)$  es un valor clave en el rendimiento del receptor. Este valor depende de la codificación, la difusión y la modulación utilizada para una determinada tasa de datos y también para una velocidad promedio de movilización del dispositivo celular y para una determinada tasa de error de trama (Frame Error Date – FER = 1 %).

Para el cálculo del diseño de las redes CDMA2000 este valor se lo toma en referencia a los estándares o estudios realizados para un canal AWGN (Ruido Gaussiano Blanco Aditivo). Para las redes CDMA2000 1X que solo transportan los servicios de voz su valor es de 4.9 dB. Mientras que para las redes EV-DO Rev. 0

que tienen una velocidad de uplink de 153.6 kbps cuyo esquema de modulación es 16-QAM tiene un valor de 2.2 dB. (3GPP2, 2002)

### *Sensibilidad en el Receptor*

La sensibilidad del receptor indica el nivel mínimo de señal en el conector de la antena requerida para cerrar el enlace de comunicación a una tasa de datos dada y bajo el peor de los casos en el canal de desvanecimiento, cuyo cálculo se visualiza en la ecuación 11.

$$S_{BTS[dB]} = N_{o[dB]} + \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{requerido[dB]} + NF_{[dB]} + 10 \log V_{datos-voz} \quad (11)$$

Donde  $V_{datos-voz}$  es la tasa de transferencia de datos dependiendo del servicio a proveer.

Al realizar todos estos cálculos para el receptor podemos generar la Tabla 18, la cual nos muestra los parámetros que tiene el receptor para obtener el Link Budget, considerando una pérdida en la estación base debido a los cables de 3 dB y una ganancia de la antena de 15 dBi de acuerdo a las especificaciones de la antena a utilizar.

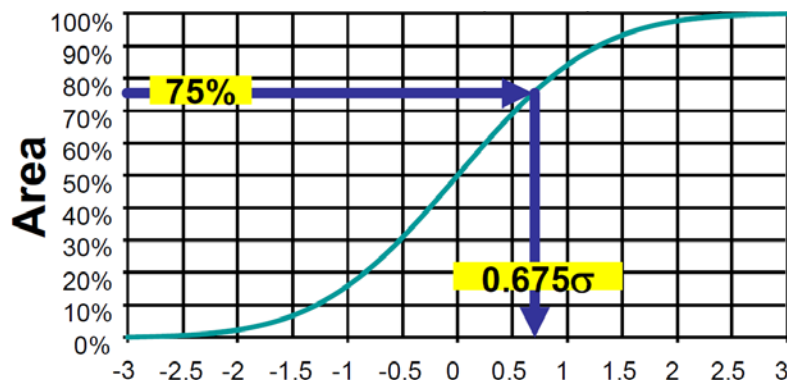
El parámetro  $L_{Fading}$  se considera como un margen de seguridad contra el ensombrecimiento en la ruta o enlace de la señal de radio causando efectos de desvanecimiento en la señal recibida. Este efecto de desvanecimiento de sombra a largo plazo que se lo representa en escala de decibelios, por lo general sigue una distribución normal y por lo tanto también se le conoce como Desvanecimiento Normal Logarítmico. El margen de desvanecimiento se calcula para un entorno de propagación dado y para una determinada fiabilidad de cobertura o probabilidad de interrupción.

Tabla 18.

## Parámetros del Receptor en el cálculo del Link Budget CDMA Reverse Link

Parámetros Receptor	Unidades	CDMA2000 1x Voz 9.6 Kbps	1x EV-DO Rev. 0 153.6 Kbps	Ecuación
$\frac{E_b}{N_o}$ Requerido	dB	4.9	2.2	
Densidad Espectral de Ruido Térmico $N_o$	dBm/Hz	-174.0	-174.0	
Velocidad de Datos en dB	dB	39.8227	51.8639	$10\log(V_{datos-voz})$
Figura del Ruido de la BTS (NF)	dB	5.0	5.0	
Sensibilidad $S_{BTS}$	dB	-124.2773	-114.9361	11
Perdidas en el Cable de la BTS $L_{C,BTS}$	dB	3.0	3.0	
Ganancia de la Antena de la BTS $G_{BTS}$	dB	15.0	15.0	

El margen de desvanecimiento depende de la desviación estándar del desvanecimiento por sombra normal logarítmica, de la pendiente de pérdida de trayecto, y de la fiabilidad de la cobertura. El parámetro  $L_{Fading}$  es mayor para terrenos con un mayor grado de variación, por ejemplo, las regiones urbanas, y es menor para terrenos planos. Además para un mayor nivel de fiabilidad de la cobertura se debe considerar un mayor margen de desvanecimiento. Asumiendo una probabilidad de servicio del 75% en el borde de la célula (90% dentro de la célula) se puede recibir de forma fiable la intensidad de señal con un nivel mayor de -105 dBm. La desviación estándar del desvanecimiento lento compuesto generalmente tiene un valor de 8 dB. En la Figura 35 podemos observar la distribución normal en base al porcentaje de cobertura que se desea tener en la célula.



**Figura 35. Gráfico de la Distribución de la Probabilidad Normal Acumulada vs. Porcentaje del Área de Cobertura**

**Fuente:** (ZTE Corporation, 2014).

Al observar la gráfica y asumiendo una probabilidad de servicio en el peor de los casos (borde de la célula) del 75% tendremos una probabilidad correspondiente a  $0.675 \sigma$ , donde  $\sigma$  es la desviación estándar del desvanecimiento lento compuesto. Por lo tanto y mediante las condiciones establecidas tendremos la ecuación 12.

$$L_{Fading} = 0.675 \sigma \quad (12)$$

$$L_{Fading} = 0.675 (8 \text{ dB}) = 5.4 \text{ dB}$$

Un sistema CDMA puede soportar la transferencia suave (soft handoff) en los bordes de las células mediante el uso de una ganancia de diversidad macroespacial, lo que reduce de manera efectiva el margen de desvanecimiento necesario para asegurar la fiabilidad del enlace. Por lo tanto el nivel de ganancia de traspaso suave depende de la varianza y la correlación de los efectos de sombra, del número de estaciones base en traspaso, y de la fiabilidad de la cobertura. Suponiendo que los efectos de sombreado independientes procedentes de dos estaciones de base cubren las áreas de traspaso, se puede estimar la ganancia de traspaso suave  $G_{SHO}$  en el rango de 2 - 4 dB en promedio.

Cuando se utiliza el terminal del usuario en ambientes indoor existe una pérdida de penetración de la edificación adicional conocida como  $L_{Bldg}$  que necesita ser considerada en el análisis de la atenuación de la señal a medida que la señal penetra a través de la estructura de la edificación y de sus paredes. Por tal motivo,  $L_{Bldg}$  depende de la estructura del edificio y la posición de la MS dentro del edificio. Existen valores típicos dependiendo del entorno donde realicemos nuestro enlace como podemos ver en la Tabla 19.

En este caso consideramos un entorno suburbano debido a que a pesar de que se encuentran las comunidades en un área rural, las edificaciones realizadas por el Gobierno Nacional permiten disponer de un área suburbana, por lo que  $L_{Bldg}$  será de 15 dB.

**Tabla 19.**

**Valores Típicos de Pérdida de Penetración de la Señal en las Edificaciones.**

<i>Entorno</i>	<i><math>L_{Bldg}</math></i>
<b>Urbano Denso</b>	25 dB
<b>Urbano</b>	20 dB
<b>Suburbano</b>	15 dB
<b>Rural</b>	6 dB
<b>Tierra Abierta</b>	0 dB

**Fuente:** (CDMA University, 2010)

En muchos casos y especialmente para aplicaciones de voz, el terminal de usuario se utiliza muy cerca del cuerpo del usuario, que actúa como un conductor. En estos casos, el diagrama de antena se ve afectada por el cuerpo del usuario y la potencia recibida es menor. Este efecto se le considera como el factor de pérdida de cuerpo  $L_{Body}$  en los cálculos del link budget. En el servicio de voz se aplica un valor



de 3 dB, mientras que para el servicio de datos debido al uso de un terminal o modem en el ordenador se considera un valor de 1 dB.

En la Tabla 20 vamos a considerar los parámetros existentes en el canal o medio a transmitir.

**Tabla 20.**

**Parámetros del Canal en el cálculo del Link Budget CDMA Reverse Link.**

Parámetros del Canal	Unidades	CDMA2000 1x Voz 9.6 Kbps	1x EV-DO Rev. 0 153.6 kbps
<i>Probabilidad de Servicio en el Borde de la Célula</i>	%	75%	75%
<i>Desviación Estándar del Desvanecimiento Lento Compuesto</i>	dB	8.0	8.0
<i>Margen de Desvanecimiento <math>L_{Fading}</math></i>	dB	5.4	5.4
<i>Pérdida de Penetración en la Construcción <math>L_{Bldg}</math></i>	dB	15	15
<i>Pérdida del Cuerpo del Usuario <math>L_{Body}</math></i>	dB	3	1
<i>Ganancia del Traspaso Suave <math>G_{SHO}</math></i>	dB	4.0	4.0

Ahora obtenidos los parámetros del transmisor, receptor y del canal podemos obtener la MAPL sin carga mediante la ecuación 13.

$$MAPL_{No\_Load} = EIRP_{Estación\ Móvil} - L_{Bldg} - L_{Body} - S_{BTS} - L_{Fading} + G_{SHO} + G_{BTS} - L_{CBTS} \quad (13)$$

Al aplicar esta ecuación para los servicios de voz CDMA2000 1x y CDMA2000 1x-EVDO obtendremos los siguientes valores.

$$MAPL_{NoLoad[voz]} = 140.4596 \text{ dB}$$

$$MAPL_{NoLoad[datos]} = 134.3882 \text{ dB}$$

El efecto de la carga es debido a la disminución del incremento de la interferencia sobre el ruido. La interferencia cocanal del enlace ascendente incrementa el ruido de fondo en la Estación Móvil por lo que degrada la sensibilidad en el receptor y disminuye la MAPL. El porcentaje de degradación es directamente proporcional a la relación del ruido total y a la densidad espectral del ruido provocado por la interferencia cuyo valor es igual a  $1/(1 - L)$ , donde  $L$  es el factor de carga en la capacidad del sistema que equivale al 50%. Por lo tanto, al traducir esto a la escala de los decibeles la MAPL se reduce por el denominador *margen de interferencia* como se muestra en la ecuación 14:

$$MAPL_{[dB]} = MAPL_{NoLoad[dB]} - Interference\ Margin_{[dB]} \quad (14)$$

Dónde:

$$Interference\ Margin_{[dB]} = 10 \log\left(\frac{1}{1-L}\right) = 3.0103 \text{ dB} \quad (15)$$

Al realizar la reducción de la MAPL debido a la carga del sistema tendremos los siguientes valores:

$$MAPL_{[voz]} = 137.4493 \text{ dB}$$

$$MAPL_{[datos]} = 131.3779 \text{ dB}$$

### Link Budget del Enlace Descendente para la red CDMA

En principio el análisis del Link Budget del Enlace Descendente es similar al que se realizó en el Enlace Ascendente. Sin embargo, existen algunas diferencias debido a la división de la potencia de la BTS entre el tráfico múltiple dedicado y los canales de control común/broadcast, junto con el balance del enlace.

Para el cálculo de la señal recibida en la estación móvil y las pérdidas del enlace se realizarán tomando en cuenta las ecuaciones 16 y 17:

$$RX_{MS} = 10 \times \log(\alpha_T) + EIRP_{BTS} - L_{Path} - L_{Fade} + G'_{SHO} + G_{MS} - L_{Bldg} - L_{Body} \quad (16)$$

$$L_{Path} = 10 \times \log(\alpha_T) + EIRP_{BTS} - RX_{MS} - L_{Fade} + G'_{SHO} + G_{MS} - L_{Bldg} - L_{Body} \quad (17)$$

Donde  $\alpha_T$  el porcentaje de la potencia total ubicada al canal de tráfico.

Se debe considerar que en el cálculo de la Sensibilidad en el receptor  $S_{MS}$  será calculado de la misma forma como se calculó en el enlace ascendente, es decir, mediante la ecuación 11 y la EIRP será calculada de la siguiente manera mediante la ecuación 18.

$$EIRP_{BTS\_Max} = P_{TX\_BTS} + G_{TX\_BTS} - L_{CMS} \quad (18)$$

Donde como se especificó en el enlace ascendente la ganancia de la antena  $G_{TX\_BTS}$  tendrá un valor igual a 15 dBi y las pérdidas de los cables  $L_{CMS}$  tendrán un valor igual a 3 dB. La potencia máxima que puede consumir la BTS es de 20 W, cuyo valor en decibels será de 43.01 dBm.

El porcentaje que se va a utilizar en la potencia total ubicada a los canales de tráfico tiene un valor fijo de 10% para los servicio de voz y datos. Por lo que el cálculo de la EIRP incluyendo el porcentaje para los canales de tráfico será reducir el

$EIRP_{BTS\_Max}$  en 10 dBi ya que al reducir este valor se obtiene el 10% de la potencia total en watts y cuyo cálculo esta descrito en la ecuación 19.

$$EIRP_{BTS\_Max\_Traff} = EIRP_{BTS\_Max} - 10 \text{ dBi} \quad (19)$$

El efecto de la interferencia dentro de la misma célula o entre otras células el cual se conoce como *margen de interferencia* tiene un valor típico de 3 dB. No se debe confundir con el margen de interferencia provocado por la carga del sistema en el enlace ascendente, ya que es el resultado del incremento de la interferencia del enlace descendente sobre el ruido de la estación base.

La interferencia entre otras células es causada por la potencia de la señal recibida desde todas las estaciones base en el área y dentro de las cuales no están activos los canales de tráfico.

La interferencia de la misma célula es causada por otros canales de tráfico así como los canales de control común y de broadcast transmitidos desde la estación base que está en servicio. Debido a la ausencia del multitrayecto esta porción de la señal recibida debe ser ortogonal a la señal de tráfico deseado debido a la ortogonalidad de los códigos de canalización de Walsh. Sin embargo, los códigos de Walsh en su versión multitrayecto no son ortogonales entre sí, por lo tanto parte de la ortogonalidad se pierde en el extremo receptor, lo que resulta en la interferencia de la misma célula distinta de cero. La interferencia total es la suma de  $I_{oc}$  (Densidad Espectral de Interferencia Total Recibida de otras celdas) y  $I_{sc} = \varphi \cdot P_{MS}$  (Densidad Espectral de Interferencia Total Recibida de la misma celda), donde  $\varphi$  es el factor de ortogonalidad, el cual tiene un valor entre 0.1 – 0.25.

De esa forma se puede obtener los parámetros del transmisor del enlace, es decir de la Estación Base los cuales se visualizan en la Tabla 21.

Tabla 21.

## Cálculo del EIRP en el Transmisor para el Link Budget CDMA Forward Link.

Cálculo de EIRP	Unidades	CDMA2000 1x Voz 9.6 Kbps	1x EV-DO Ver. 0 2.457 Mbps	Ecuación
<i>Potencia Máxima de Transmisión de la Estación Base</i>	W	20.00	20.00	
<i>Potencia Máxima de Transmisión de la Estación Base</i>	dBm	43.0103	43.0103	
<i>Pérdidas en los Cables <math>L_{C_{BTS}}</math></i>	dB	3	3	
<i>Ganancia de la Antena <math>G_{BTS}</math></i>	dB	15	15	
<i><math>EIRP_{BTS\_Max}</math></i>	dBm	55.0103	55.0103	18
<i>Máximo Porcentaje de Ubicación de Potencia en el Canal de Tráfico</i>	%	10%	10%	
<i><math>EIRP_{BTS\_Max\_Traff}</math></i>	dBm	45.0103	45.0103	19

En los parámetros del receptor se tiene los valores de  $\frac{E_b}{N_o}$  requerido para las tasas de datos de 9.6 kbps igual a 4.9 dB y para 2.4576 Mbps es igual a 10.5 dB con una modulación 16-QAM. El valor de la Figura del Ruido cambia a 8.5 dB, por lo que tendremos en la Tabla 22 los parámetros del receptor modificados para el enlace descendente.

Los parámetros del medio o canal se mantienen con los mismos valores que en el enlace reverso. Aunque se debe considerar que la transferencia o handoff en el enlace descendente también proporciona cierta ganancia de diversidad macroespacial. Sin embargo, debido a que el canal suplementario utiliza un conjunto activo reducido y la selección de sectores o células tiene un proceso opuesto a combinación de relación máxima donde se suman todas las señales. De esa forma la ganancia de transferencia

suave (soft handoff)  $G_{SHO}$  eficaz para los canales de alta tasa de datos es ligeramente inferior a la de los canales de voz

**Tabla 22.**

**Parámetros del Receptor en el cálculo del Link Budget CDMA Forward Link**

Parámetros Receptor	Unidades	CDMA2000 1x Voz 9.6 Kbps	1x EV-DO Rev. 0 2.4576 Mbps	Ecuación
$\frac{E_b}{N_o}$ Requerido	dB	4.9	10.5	
Densidad Espectral de Ruido Térmico $N_o$	dBm/Hz	-174.0	-174.0	
Velocidad de Datos en dB	dB	39.8227	63.9052	$10\log(V_{datos-voz})$
Figura del Ruido de la MS (NF)	dB	8.5	8.5	
Sensibilidad $S_{MS}$	dB	-120.7773	-91.0948	11
Ganancia de la Antena $G_{MS}$	dB	2.1	2.1	
Pérdidas por los Cables $L_{CMS}$	dB	0	0	

De esta forma la ganancia  $G_{SHO}$  para el servicio de datos es de 3 dB a diferencia del servicio de voz que tiene un valor promedio de 4 dB. En la Tabla 23 podemos observar los parámetros del medio.

Con todos estos datos podemos obtener la MAPL en el enlace descendente mediante la ecuación 20.

$$MAPL_{No\_Load} = EIRP_{BTS\_Max\_Traff} - L_{Bldg} - L_{Body} - S_{MS} - L_{Fading} + G_{SHO} + G_{MS} - L_{CMS} \quad (20)$$

Al reemplazar estos valores obtendremos los siguientes valores.

$$MAPL_{No\_Load[voz]} = 148.4876 \text{ dB}$$

$$MAPL_{No\_Load[datos]} = 119.8051 \text{ dB}$$

Tabla 23.

## Parámetros del Canal en el cálculo del Link Budget CDMA Forward Link.

Parámetros del Canal	Unidades	CDMA2000 1x Voz 9.6 Kbps	1x EV-DO Rev. 0 2.4576 Mbps	Ecuación
<i>Probabilidad de Servicio en el Borde de la Célula</i>	%	75%	75%	
<i>Desviación Estándar del Desvanecimiento Lento Compuesto</i>	dB	8.0	8.0	
<i>Margen de Desvanecimiento <math>L_{Fading}</math></i>	dB	5.4	5.4	
<i>Pérdida de Penetración en la Construcción <math>L_{Bldg}</math></i>	dB	15.0	15.0	
<i>Pérdida del Cuerpo del Usuario <math>L_{Body}</math></i>	dB	3	1	
<i>Ganancia del Traspaso Suave <math>G_{SHO}</math></i>	dB	4.0	3.0	

Finalmente al tomar en cuenta las pérdidas provocadas por la interferencia entre células o en la misma célula se debe tomar en cuenta el Margen de Interferencia cuyo valor es de 3 dB. Al reducir este valor de la *MAPL* con la carga del sistema (Korowajczuk, De Souza, & Moreira, 2004).

$$MAPL_{[voz]} = 145.4876 \text{ dB}$$

$$MAPL_{[datos]} = 116.8051 \text{ dB}$$

### Link Budget en las Redes LTE

Para el presente cálculo del Link Budget se lo va a dividir en tres componentes. En el primer componente se calculará la potencia que irradian antenas en el medio ambiente circundante, el segundo componente corresponde al nivel de la señal que se

necesita para que la señal sea recibida, y el tercer componente se ocupa de los parámetros que se encontrarían entre el transmisor y el receptor.

En la Tabla 24 se tendrán en cuenta todos los parámetros referentes al primer componente de nuestro análisis. Estos componentes ayudarán a determinar el EIRP.

**Tabla 24.**

**Cálculo del EIRP en los enlaces descendente y ascendente en LTE.**

Parámetro del TX	Valor	Enlace Descendente	Enlace Ascendente	Referencia
<i>Potencia de TX [dBm]</i>	$P$	43	23	El eNodeB tiene una potencia máxima de 20 W (43 dBm). Mientras el UE según la especificación 3GPP TS 36.101 V8.6.0 (2009-06) Sección 6.2.2 tiene una potencia máxima de 23 dBm para la clase 3 de los UEs.
<i>Número de Antenas Transmisoras</i>	$N_{TX}$	2	1	El eNodeB utiliza el sistema MIMO 2X2.
<i>Ganancia de la Diversidad en la Transmisión [dB]</i>	$G_{TXDG}$	3	0	Se utiliza para transmitir información en broadcast desde múltiples antenas. Se aplica la ecuación 21: $G_{TXDG} = 10 \log N_{TX}$ (21)
<i>Pérdidas por los cables [dB]</i>	$L_{TX,LL}$	1	0	En el eNodeB se asume pérdidas de los cables de 1 dB que compone todos los elementos como conectores, puentes, líneas de transmisión, etc. entre la estación base y la antena. En el UE el valor es de 0 dB.
<i>Ganancia de la Antena TX [dBi]</i>	$G_{TX}$	15.7	3	Se siguen las especificaciones del eNodeB. Mientras que en el UE según la especificación ITU-R JTG4567 para equipos que trabajen en la banda VHF se tiene un valor de 3dB.
<i>Ganancia del Arreglo Adaptativo Transmisor [dB]</i>	$G_{AA}$	5	0	Este valor se aplica en el eNodeB para el enlace descendente con un valor de 5 dB (0° de tilt eléctrico) para zonas rurales y suburbanas.
<i>TX EIRP [dBm]</i>	$TX_{EIRP}$	64.7	27	Ecuación 22



Para el cálculo de la EIRP se lo realiza mediante la ecuación 22.

$$TX_{EIRP} = P + G_{TXDG} - L_{TXLL} + G_{TX} + G_{AA} \quad (22)$$

Se requiere calcular los parámetros del receptor a fin de obtener el nivel o sensibilidad de la señal recibida y sus parámetros de cálculo se observan en la Tabla 25.

Para el cálculo de la Sensibilidad de Desvanecimiento en el Receptor se aplica la ecuación 23.

$$RX_{FS} = kT + 10 \log(SC_{BW} \times SC_O) + NF + SNR + FF - G_{RXDG} - HARQ \quad (23)$$

Mientras que para el cálculo de la Sensibilidad de Desvanecimiento Efectiva en el Receptor se ejecuta la ecuación 24.

$$RX_{EFS} = RX_{FS} - G_{RX} + L_{RXLL} \quad (24)$$

En el tercer componente se juntan los componentes anteriores de transmisión y recepción para calcular el MAPL o la también denominada Ganancia del Sistema, la cual es la diferencia en decibelios entre la potencia de salida RF del transmisor y el umbral o sensibilidad práctico del receptor. Básicamente, representa la cantidad de pérdida de propagación que puede ser tolerada entre la antena en la estación base y la antena del dispositivo del abonado. En la Tabla 26 se observa el cálculo del MAPL para LTE.

El cálculo de la MAPL para LTE se lo realiza mediante la ecuación 25 (Telecom Funda, 2012).

$$MAPL_{LTE} = TX_{EIRP} - RX_{EFS} - L_{BV} - M_{interf} - M_{SF} \quad (25)$$

Tabla 25.

## Cálculo de la Sensibilidad de Desvanecimiento Efectiva en el Receptor.

Parámetro	Valor	Enlace Descendente	Enlace Ascendente	Referencia
<b>Ruido Térmico</b> [dBm/Hz]	$kT$	-174	-174	Ecuación 11
<b>Ancho de Banda de la Subportadora</b> [Hz]	$SC_{BW}$	15000	15000	Por las especificaciones del 3GPP un canal con un ancho de banda de 15 MHz se tiene un ancho de banda de la subportadora de 15 kHz.
<b>Subportadoras Ocupadas</b>	$SC_o$	900	120	En un canal con un ancho de banda de 15 MHz se tiene un total de subportadoras por bloque de recursos de 12. Además se tiene un total de bloques de recursos de 75 para la banda de 15 MHz, por lo que al multiplicar dichos valores se tiene un total de 900. Para el enlace ascendente asumimos 10 bloques de recurso.
<b>Figura del Ruido</b> [dB]	$NF$	6	4	La figura de ruido de una red es un valor usado para comparar el ruido en una red con el ruido en una red ideal o silenciosa. Es la medida de la relación Señal a Ruido (SNR) en los puertos de entrada de la red. Para el eNodeB se tienen valores de entre 4 – 6 dB, mientras que para el UE se reduce en 2 dB el valor escogido para el eNodeB.
<b>Esquema de Modulación y Codificación MCS</b>		QPSK	QPSK	
<b>SNR neto, incluyendo un margen de implementación</b> [dB]	SNR	-3.8	-4.6	La relación SNR compara el nivel de una señal deseada para el nivel de ruido del ambiente. Se asume un valor de -7.1 dB para el uplink y de -6.3 dB con modulación QPSK al comparar con las tablas 7.1.7.1-1, 8.6.1-1 y 7.2.3-1 de la norma 3GPP TS 36.213 V8.7.0. El margen de implementación se utiliza para incluir los efectos del receptor no ideales, tales como errores de estimación de canal, los errores de seguimiento, los errores de cuantificación, y ruido de fase.

Continua 

<p><b>Margen de Desvanecimiento Rápido [dB]</b></p>	<p><i>FF</i></p>	<p>4.5</p>	<p>4.5</p>	<p>Para una modulación QPSK este margen tiene un valor de 2.5 dB. Debido a los efectos del multitrayecto se generan efectos como la atenuación, retardo y desplazamiento de fase de la señal por lo que se genera una interferencia destructiva que atenúa la señal lo que provoca una falla temporal de la comunicación debido a una fuerte caída en la relación Señal a Ruido. La fluctuación a corto plazo causada por el multitrayecto se considera Margen de Desvanecimiento Rápido. Para el cálculo del Desvanecimiento Rápido se asume un modelo Pedestrian B de 3 km/h debido a la ausencia de automóviles en la zona por lo que el margen de desvanecimiento es de 4.5 dB mediante la tabla obtenida de la recomendación <i>ITU-R M.1225: Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies</i>.</p>
<p><b>Ganancia de Diversidad en el Receptor [dB]</b></p>	<p><math>G_{RXDG}</math></p>	<p>3</p>	<p>3</p>	<p>La diversidad espacial requiere el uso de 2 o más antenas, lo que permite la no correlación de las señales provocando una mejor calidad en la potencia de las mismas. Se lo realiza mediante la Relación de Combinación Máxima (MRC) que combina la energía de las dos señales recibidas. Dado el caso que en el UE y el eNodeB tenemos 2 antenas, el valor que se asume en este caso es de 3 dB.</p>
<p><b>Ganancia HARQ [dB]</b></p>	<p><i>HARQ</i></p>	<p>0</p>	<p>0</p>	<p>Esta ganancia solamente se aplica en los canales de tráfico de Uplink y Downlink. Por lo que si se añade esta ganancia aumentará el rango de los canales de tráfico pero provocará una reducción en la velocidad física del borde de la célula debido al requerimiento de más retransmisiones. Por lo tanto no se toma en cuenta esta ganancia y su valor es de 0 dB.</p>

Continua



<b>Sensibilidad de Desvanecimiento en el Receptor [dB]</b>	$RX_{FS}$	-98.9966	-110.5473	Ecuación 23
<b>Ganancia de la Antena RX [dBi]</b>	$G_{RX}$	3	15.7	Referencias similares a la Ganancia de la Antena TX.
<b>Pérdidas en la Línea de RF [dB]</b>	$L_{RX\_LL}$	0	1	Referencias similares a las Pérdidas de Línea en el Transmisor.
<b>Sensibilidad de Desvanecimiento Efectiva en el Receptor [dB]</b>	$RX_{EFS}$	-101.9966	-125.2470	Se determina restando las pérdidas y sumando las ganancias entre el receptor y la antena Rx. Para este cálculo el punto de referencia es la energía que se recibe en la antena Rx y se calcula mediante la ecuación 24.

Tabla 26.

## Cálculo del MAPL para LTE en los Enlaces Ascendente y Descendente.

Parámetro	Valor	Enlace Descendente	Enlace Ascendente	Referencia
<b>TX EIRP [dBm]</b>	$TX_{EIRP}$	64.7	27	Ecuación 22
<b>Sensibilidad de Desvanecimiento Efectiva en el Receptor [dB]</b>	$RX_{EFS}$	-101.9966	-125.2470	Ecuación 24
<b>Pérdidas por las Edificaciones y el Cuerpo del Usuario</b>	$L_{BV}$	18	18	Se toman los mismos valores que en el cálculo del Link Budget para CDMA, lo que nos da un total de 18 dB, es decir 15 dB de la pérdida de las edificaciones y 3 por la pérdida del usuario.
<b>Margen de Interferencia [dB]</b>	$M_{interf}$	3	3	Es considerado como un aumento en el nivel de ruido causado por los sitios que utilizan las mismas frecuencias y se encuentra lo más cerca posible que aquellos sitios más alejados debido al ruido térmico. Se recomienda utilizar un valor de 3 dB.
<b>Margen Normal Logarítmico (Desvanecimiento Lento) [dB]</b>	$M_{SF}$	6.5	6.5	Este parámetro tiene una definición similar al parámetro $M_{Fading}$ utilizado en CDMA. En este caso se asume un valor de 6.5 dB.
<b>MAPL [dB]</b>	$PL$	139.1966	124.7470	Ecuación 25

#### 4.1.2. Cálculo de las Pérdidas de los Enlaces

Para efectos de nuestro proyecto vamos a utilizar las siguientes especificaciones que corresponden a los parámetros de diseño de las redes CDMA y LTE y el modelo de propagación de Okumura – Hata. En la tabla 27 se puede observar los parámetros a tomar en cuenta en el diseño de las redes. En el caso de la frecuencia para CDMA utilizaremos la primera portadora o el canal N° 160 que tiene un rango de frecuencia de 463.350 MHz – 464.600 MHz para el enlace descendente en la cual tiene un ancho de banda de 1.25 MHz. Por lo tanto la frecuencia de portadora o referencia que vamos a ocupar es la frecuencia intermedia de este canal, es decir para el Downlink tendremos una  $f = 463.975 \text{ MHz}$  (CDG, 2006).

En el caso de LTE vamos a trabajar con un ancho de banda de 15 MHz basado en las especificaciones antes mencionadas. De esa forma se tiene un rango de frecuencias para el enlace descendente de 788 – 803 MHz. En este caso la frecuencia de portadora o intermedia será de  $f = 795.5 \text{ MHz}$ .

Cabe destacar que para este Modelo Empírico solamente es factible realizar el cálculo de la distancia de la célula para el enlace descendente, ya que el rango de las alturas de las antenas transmisora y receptora no son acordes para el enlace ascendente y cuyas especificaciones se las puede visualizar en la Tabla 27.

**Tabla 27.**

**Especificaciones de Diseño de las redes CDMA y LTE para el cálculo de las pérdidas por el Modelo de Okumura Hata.**

Parámetros del Modelo de Okumura Hata	Red CDMA	Red LTE
<i>Frecuencia <math>f</math></i>	Downlink: $f = 463.975 \text{ MHz}$	Downlink: $f = 795.5 \text{ MHz}$
<i>Altura Efectiva de la Antena Transmisora <math>h_b</math></i>	Downlink: 80 m	Downlink: 80 m
<i>Altura sobre el suelo de la Antena Receptora <math>h_m</math></i>	1.6 m	1.6 m

Al tener estas especificaciones y reemplazando las ecuaciones 1, 2 y 6 tendremos los siguientes valores en las pérdidas de propagación por Okumura – Hata expresadas en las ecuaciones 26 y 27.

$$L_{Path\_CDMA\_DOWN} = 86.7417 + 32.4348 \log d \text{ [db]} \quad (26)$$

$$L_{Path\_LTE\_DOWN} = 91.0555 + 32.4348 \log d \text{ [db]} \quad (27)$$

#### **4.1.3. Simulación de las Redes CDMA y LTE en la herramienta SIRENET**

Para la simulación de las redes CDMA y LTE se utilizará el programa de planificación radioeléctrica SIRENET. Como las áreas donde se ubican las Comunidades del Milenio pertenecen a un entorno rural se ha determinado utilizar los modelos de Propagación de Okumura – Hata para zonas rurales (empírico) y el modelo de Deygout (determinístico).

Se han tomado las siguientes especificaciones en el cálculo de las redes CDMA 450 y LTE APT 700, tomando en cuenta que las radiobases se ubican en cada Comunidad, es decir, Pañacocha y Playas de Cuyabeno. En las tablas 28 y 29 se observan las características de cada Estación Base para cada red.

Los resultados de las simulaciones se presentan a continuación en las Figuras 36, 37, 38, 39, 40 y 41; las cuales nos indican la cobertura de las redes de voz y datos de CDMA 450 MHz y la red de datos APT LTE 700 MHz.

Tabla 28.

## Parámetros Técnicos utilizados en la Simulación de las Redes CDMA 450.

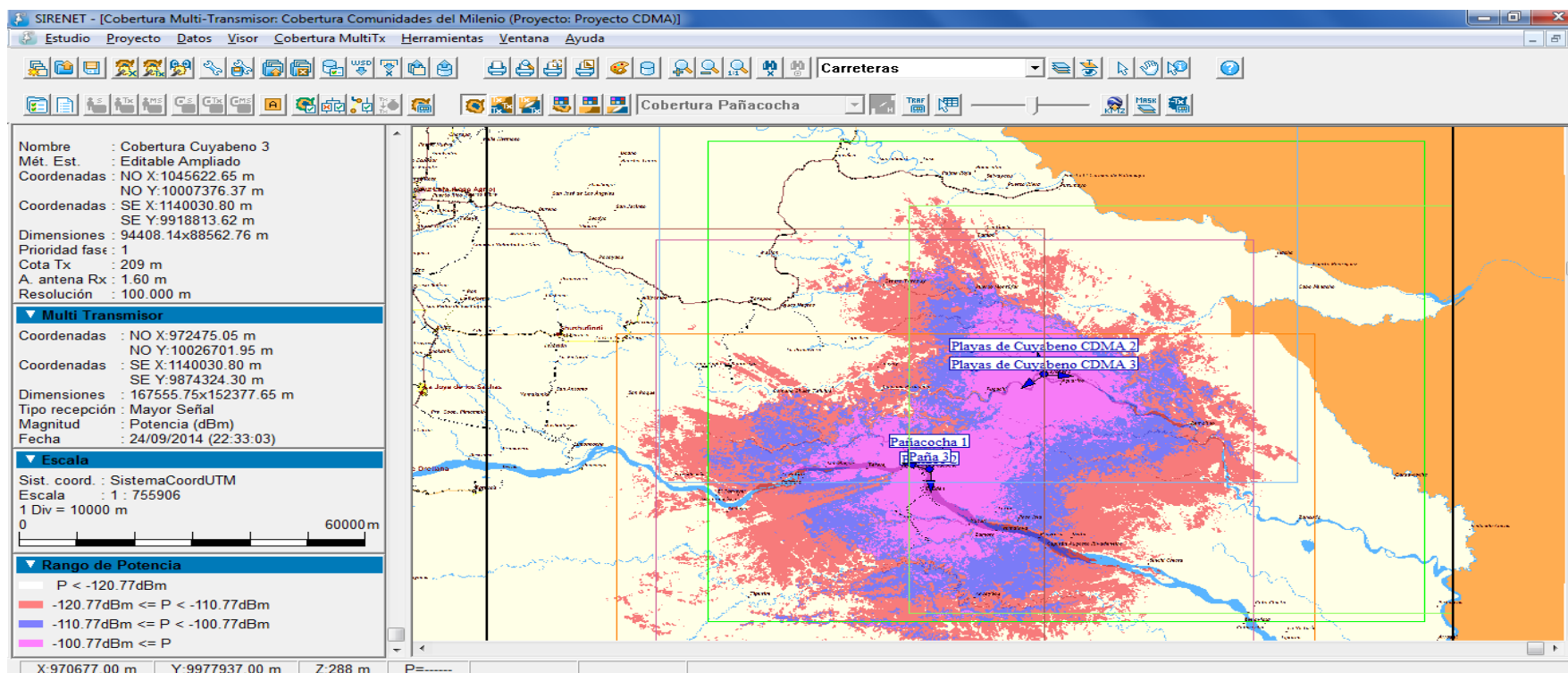
Parámetro	Red de Voz CDMA 450	Red de Datos CDMA 450
<i>Ancho de Banda [MHz]</i>		1.25
<i>Servicio</i>	Movil/Terrestre/CDMA2000/CDMA2000 Down /CDMA200 base-movil	
<i>Potencia Máxima de la antena transmisora [W]</i>		20
<i>Potencia Máxima de la antena transmisora [dBm]</i>		43
<i>Tipo de Antena</i>	Huawei Agisson DX-450-470-65-15i-0F	
<i>Ganancia de la Antena [dBi]</i>		15
<i>Pérdidas en los Cables de la Antena TX [dB]</i>		3
<i>Polarización de la Antena</i>		Vertical
<i>Banda de Frecuencia de TX [MHz]</i>	Canal N° 160 463.35 MHz – 464.60 MHz	
<i>Frecuencia de Referencia de TX [MHz]</i>		463.975
<i>Velocidad de Datos [Kbps]</i>	9.6	2457.6
<i>Potencia de la Antena del Receptor [mW]</i>		200
<i>Potencia de la Antena del Receptor [dBm]</i>		23
<i>Banda de Frecuencia de RX [MHz]</i>	Canal N° 160 453.35 MHz – 454.60 MHz	
<i>Frecuencia de Referencia de RX [MHz]</i>		453.975
<i>Altura de la Torre [m]</i>		80

Tabla 29.

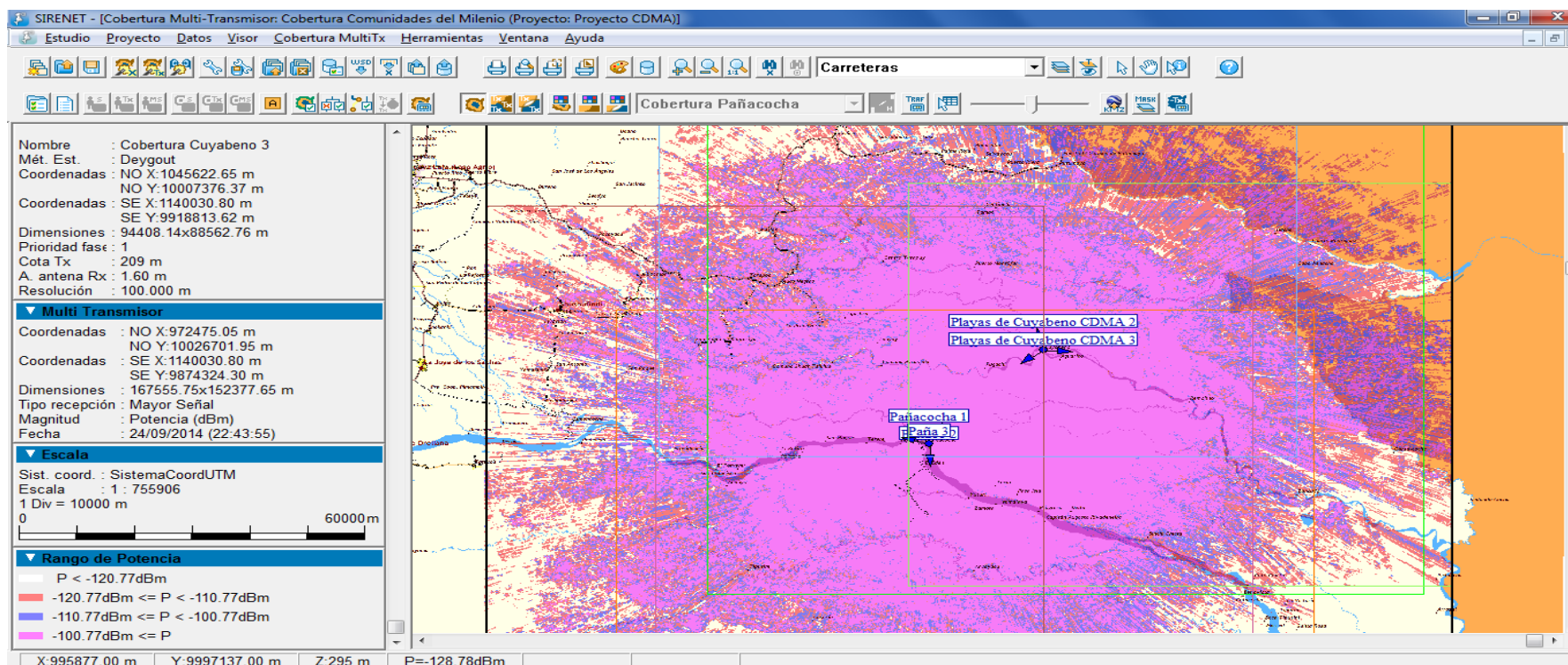
## Parámetros Técnicos utilizados en la Simulación de las Redes LTE APT 700.

<b>Parámetro</b>	<b>Red de Datos APT LTE 700</b>
<i>Ancho de Banda [MHz]</i>	15
<i>Servicio</i>	Movil/Terrestre/LTE/LTE Down /LTE base-movil
<i>Potencia Máxima de la antena transmisora [W]</i>	20
<i>Potencia Máxima de la antena transmisora [dBm]</i>	43
<i>Tipo de Antena</i>	Andrew LNX-6514DS-VTM
<i>Ganancia de la Antena [dBi]</i>	15.7
<i>Pérdidas en los Cables de la Antena TX [dB]</i>	1
<i>Polarización de la Antena</i>	Vertical
<i>Banda de Frecuencia de TX [MHz]</i>	788 MHz – 803 MHz
<i>Frecuencia de Referencia de TX [MHz]</i>	795.5
<i>Potencia de la Antena del Receptor [mW]</i>	200
<i>Potencia de la Antena del Receptor [dBm]</i>	23
<i>Banda de Frecuencia de la RX [MHz]</i>	733 MHz - 748 MHz
<i>Frecuencia de Referencia de RX [MHz]</i>	740.5
<i>Altura de la Torre [m]</i>	80

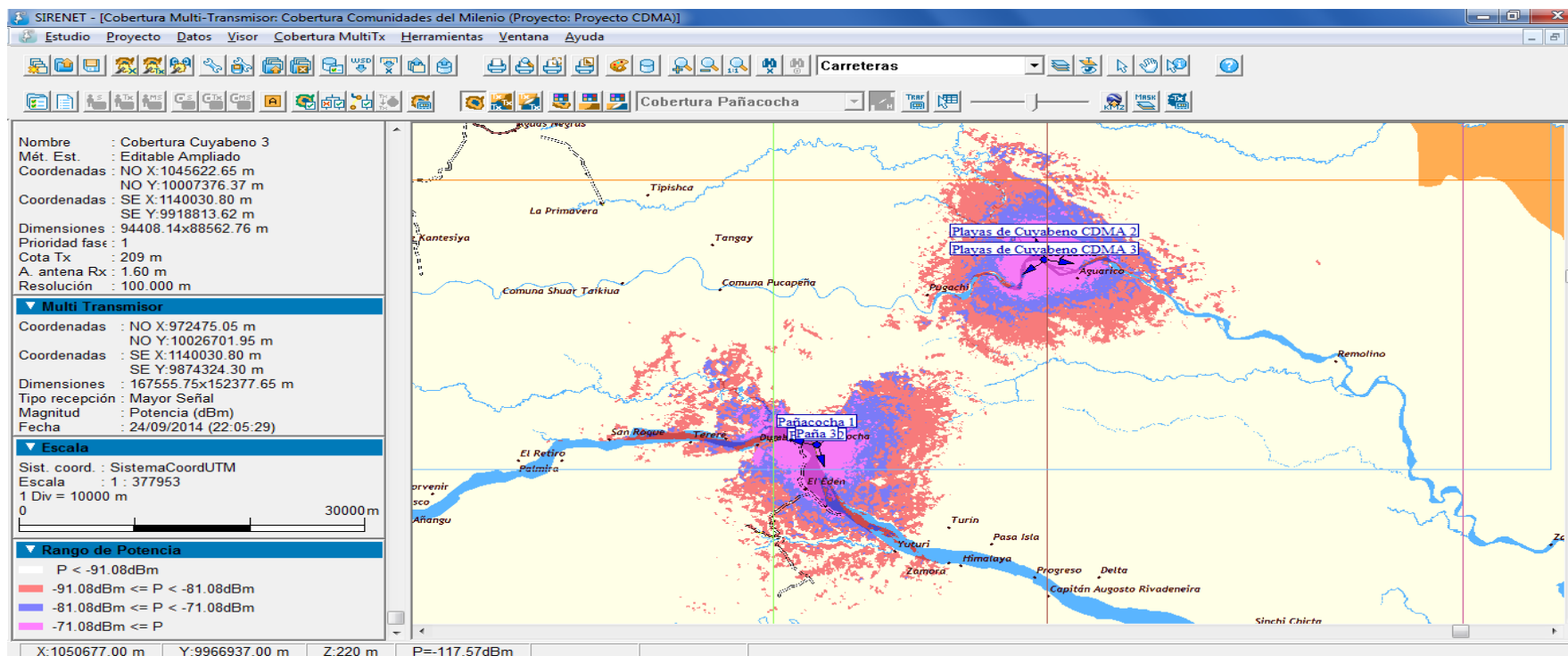




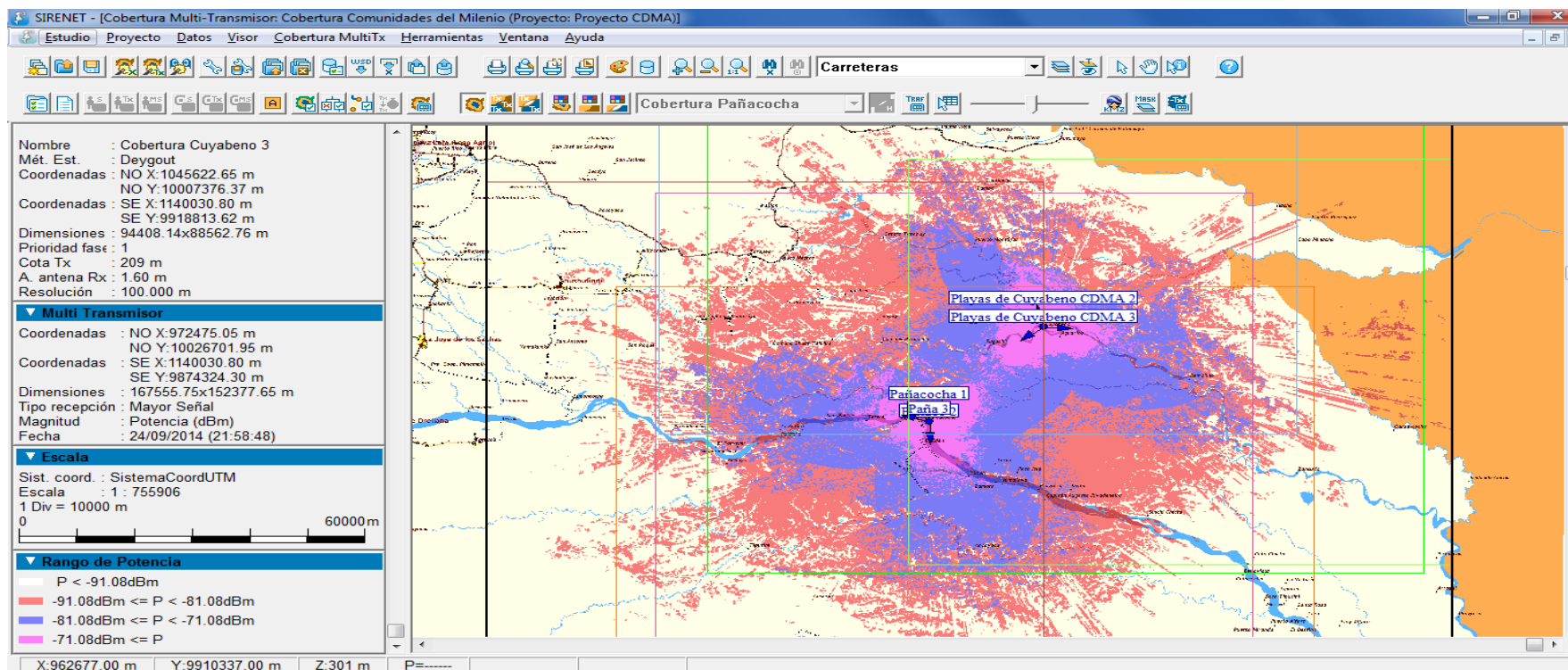
**Figura 36. Simulación de la Red de Voz CDMA 450 MHz en las Comunidades del Milenio mediante el Modelo de Propagación de Okumura Hata.**



**Figura 37. Simulación de la Red de Voz CDMA 450 MHz en las Comunidades del Milenio mediante el Modelo de Propagación de Deygout.**



**Figura 38. Simulación de la Red de Datos CDMA 450 MHz en las Comunidades del Milenio mediante el Modelo de Propagación de Okumura Hata**



**Figura 39. Simulación de la Red de Datos CDMA 450 MHz en las Comunidades del Milenio mediante el Modelo de Propagación de Deygout**

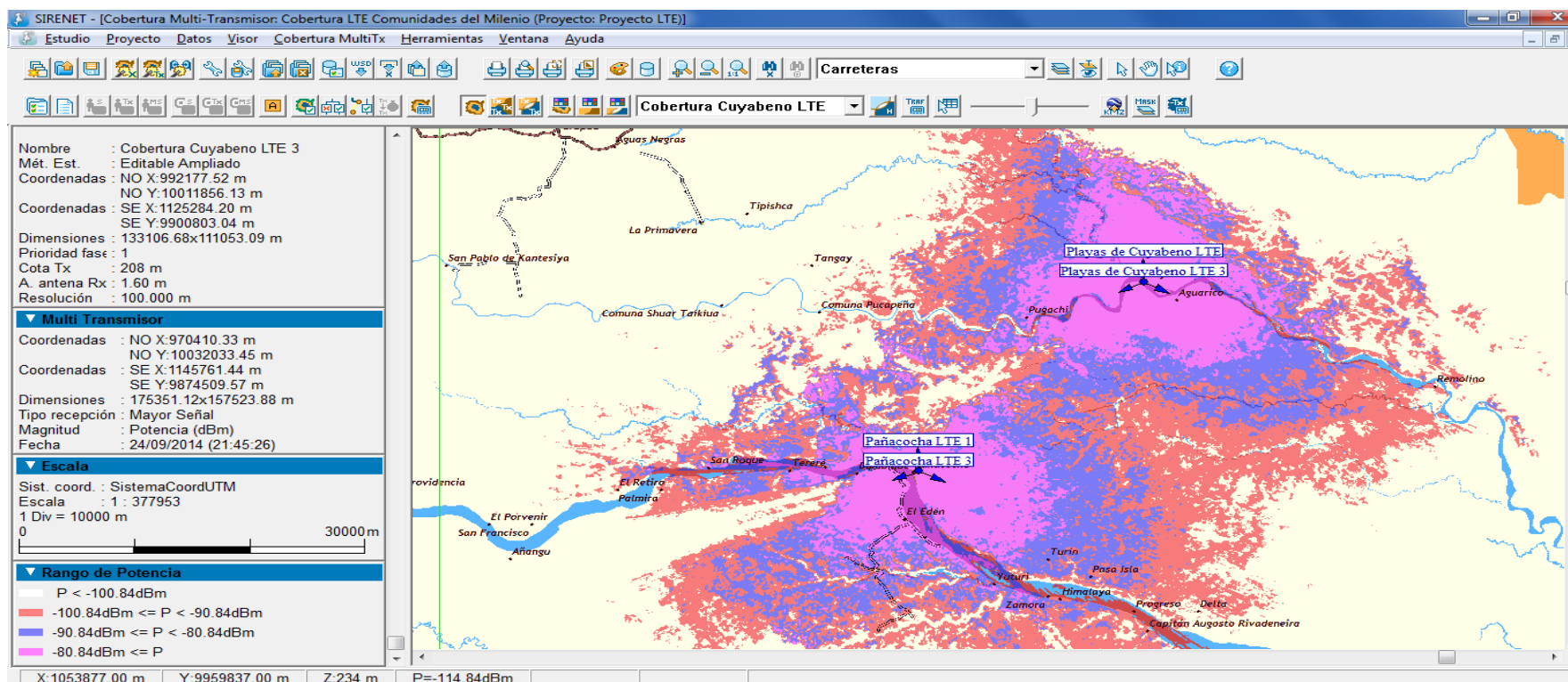
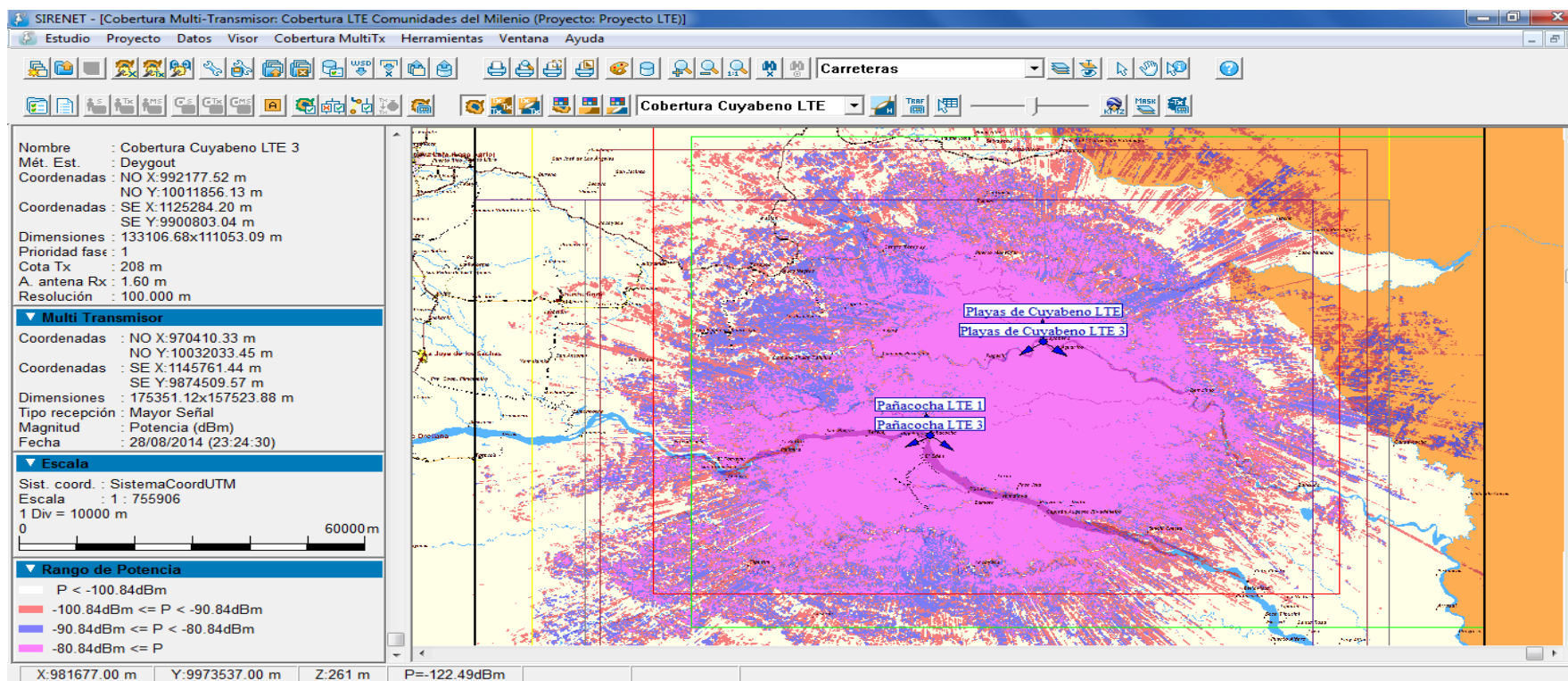
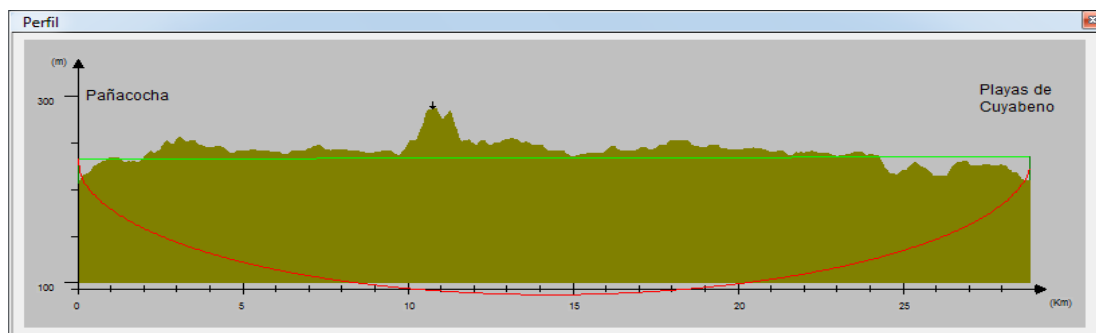


Figura 40. Simulación de la Red de Datos APT LTE 700 MHz en las Comunidades del Milenio mediante el Modelo de Propagación de Okumura Hata



**Figura 41. Simulación de la Red de Datos APT LTE 700 MHz en las Comunidades del Milenio mediante el Modelo de Propagación de Deygout**

Como se puede observar la cobertura en el método de Deygout es mayor que en el método de Okumura – Hata ya que las pérdidas que se presentan en el trayecto se incrementan debido a los obstáculos que existen en el trayecto y a los múltiples árboles que existen en el área debido a su fauna selvática. Para observar estos trayectos basta con observar el perfil de la línea de vista que se tiene desde la Comunidad de Pañacocha hasta la Comunidad de Playas de Cuyabeno como se puede observar en la Figura 42.



**Figura 42. Perfil de Línea de Vista desde Pañacocha hasta Playas de Cuyabeno**

En la presente gráfica se puede observar en total 3 obstrucciones sin tomar en cuenta los múltiples árboles que se encuentran a lo largo del perfil, por lo que al irradiar la señal se generan múltiples pérdidas hasta llegar al destino final o la primera zona de Fresnel lo que provoca un aumento en la cobertura del enlace a diferencia del método de Okumura – Hata.

Mientras que para el método de Okumura – Hata se consideró las especificaciones planteadas por el programa, el método original es bastante impreciso ya que no tiene en cuenta los efectos de los elementos determinísticos (terreno, edificios, ancho de calles, etc). Para ello se introduce una corrección en función del terreno, utilizando las pérdidas de difracción.

En base a los resultados el método más factible por la distancia cubierta y su aproximación a las comunidades o parroquias que se desea llegar a ofrecer cobertura es el de Okumura – Hata. El área que tienen las comunidades es muy pequeña

llegando cada una de estas aproximadamente a  $1 \text{ km}^2$ . Sin embargo, el largo alcance que tiene el método de Deygout y su alta precisión permite ser fiable al cubrir grandes distancias.

### **Planificación de Frecuencias**

Las antenas de las radiobases de la red CDMA 450 son direccionales con una diferencia de azimut de  $120^\circ$ . Es decir, que para cubrir la zona o el radio que está a lo largo de cada comunidad del milenio se instalan 3 antenas direccionales. Para la planificación de las frecuencias se debe tomar en cuenta que las redes CDMA poseen la reutilización de frecuencias universal (factor de reuso es igual a 1), es decir, que varios transmisores o receptores pueden utilizar la misma frecuencia de portadora tanto en el enlace ascendente como descendente. Podemos mantener esta propiedad mediante la ortogonalidad de las señales recibidas respecto a sus señales de usuario. Este factor ya fue considerado en el cálculo del Margen de Interferencia del Link Budget de las redes CDMA.

Mientras que para las redes LTE se va a utilizar un patrón de reuso  $1x3x1$  el cual consiste dividir a toda el área a cubrir en 3 sectores (células) en los cuales operan a la misma portadora. Esta técnica se la conoce como el Reuso de Frecuencia Fraccional Suave (SFR). Lo que se hace es dividir a la célula en 2 partes, en el interior de la célula se utilizan todos los subcanales, mientras que en exterior o en el borde de la célula se utiliza el  $1/3$  de todos los subcanales. De esa forma, la célula exterior de cada una de las tres células tendrá un subconjunto diferente del  $1/3$  del ancho de banda total. Esto reduce la capacidad de la célula exterior, por lo que las terminales de usuario incrementaran su potencia de transmisión para obtener mejores modulaciones y aumentar la capacidad en el borde de la célula (LTE University, 2012).



## **4.2. Dimensionamiento de la Red Celular**

Dentro de la planificación de la red celular se debe tomar en cuenta numerosos factores que se relacionan entre sí, entre los cuales se puede tomar en cuenta los siguientes:

- Cobertura Radioeléctrica
- Limitación de las frecuencias
- Movilidad de los Usuarios
- Distribución de Tráfico
- Introducción de Nuevos Servicios

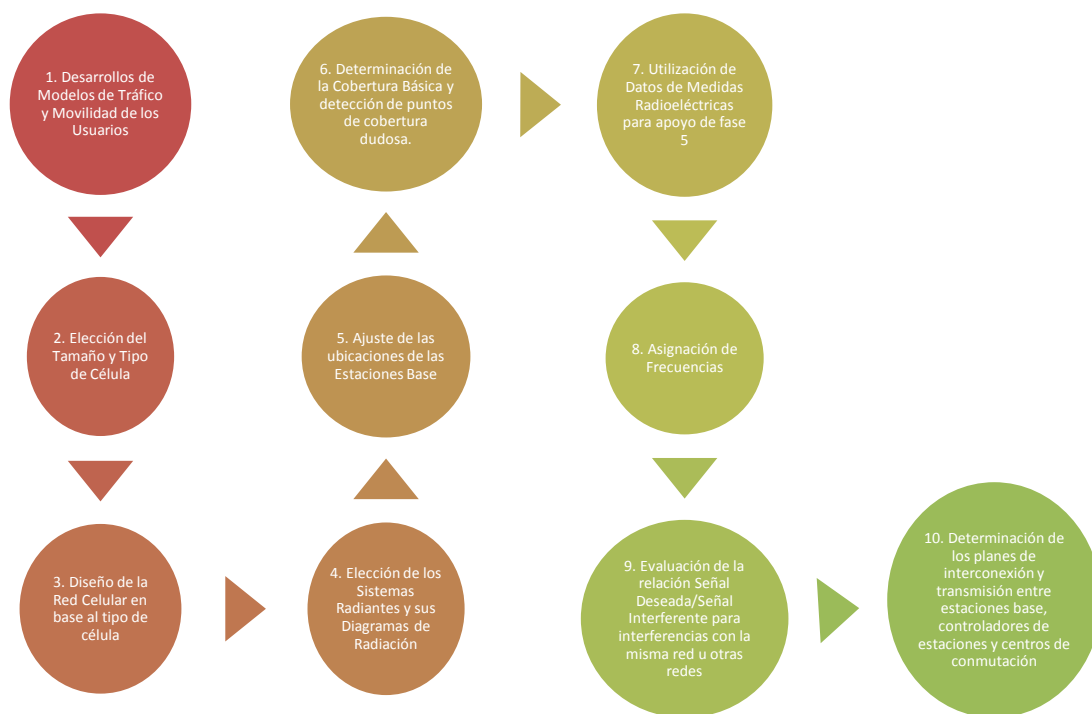
Además de tomar en cuenta todas las características técnicas para el diseño de la red se debe considerar la parte económica que influye en gran parte dentro de la realización del proyecto. La infraestructura que se aplicará dentro de la red celular requiere disponer de: casetas de equipos, accesos, enlaces de fibra óptica, torres de antenas, energía eléctrica, etc. Por tal motivo se requiere realizar una relación calidad/costo a fin de poder realizar una red que cumpla con las exigencias que requieren los clientes pero que incurra el menor costo posible para su implementación.

Las tareas que forman parte dentro de la planificación celular se encuentran en la Figura 43.

### **4.2.1. Geometría de la Red Celular**

Si fuera el caso que cada célula utilizara antenas omnidireccionales, la zona de cobertura sería aproximadamente circular. Aun así, este tipo de coberturas no recubren el área o a su vez producen solapes, lo que conlleva a una disminución del rendimiento espectral, porque se emplean dos frecuencias en un mismo punto.

Para evitar estos solapes se requieren coberturas de tipo poligonal que cumplan con este objetivo.



**Figura 43. Esquema de los Procesos a seguir dentro de la Planificación de las Redes Celulares**

**Fuente:** (Rábanos, 1998)

Existen tres polígonos que cumplen con esta condición: el triángulo, el cuadrado y el hexágono. Suponiendo que se coloca la estación base en el baricentro del polígono y que el radio de cobertura  $R$  es la distancia del baricentro a un vértice, las superficies de los polígonos se encuentran representadas en las ecuaciones 28, 29 y 30:

- Triángulo:  $S = \frac{3\sqrt{3}R^2}{4}$  (28)

- Cuadrado:  $S = 2R^2$  (29)

- Hexágono:  $S = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2}$  (30)

Mediante diseños vistos anteriormente y por la regularidad que ha tenido este polígono en el esquema de las redes celulares se ha escogido al hexágono ya que proporciona la mayor superficie de célula, por lo que, al utilizar hexágonos, será mínimo el número de células necesario para la cobertura de un área determinada.

La geometría celular proporciona las ubicaciones de estaciones base y los datos necesarios para los cálculos de interferencias, tamaño de la agrupación y distancia de reutilización.

Para la ubicación de las estaciones base se emplea un sistema de coordenadas oblicuas cuyos ejes, denominados  $u$  y  $v$  forman un ángulo de  $60^\circ$  entre sí. Las estaciones base se sitúan en puntos llamados nodos, cuyas coordenadas son números enteros. La estructura resultante se denomina retícula de planificación. La distancia entre dos nodos consecutivos se llama paso de la retícula y la designaremos por  $d$ .

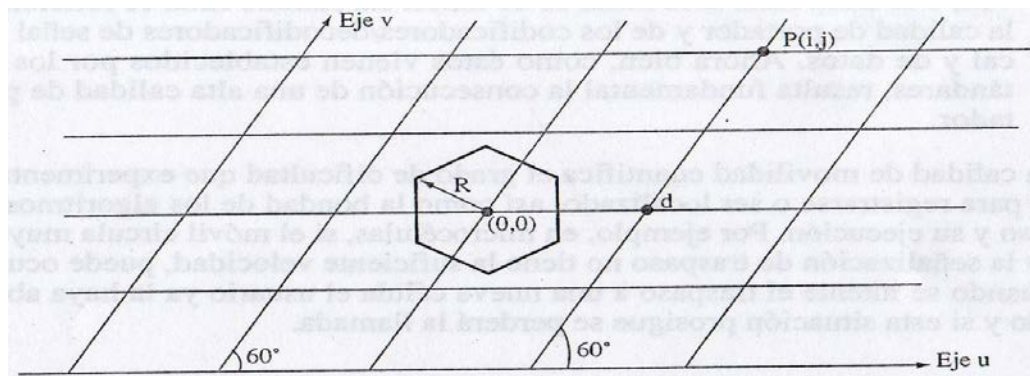
En la Figura 44, se representa una retícula de planificación con una célula omnidireccional genérica situada en el origen de las coordenadas. Los lados del hexágono constitutivo de la célula son perpendiculares a los ejes y la apotema es igual a  $d/2$ .

El radio  $R$  del hexágono, que se asocia al radio de cobertura de la célula, se le llama *radio celular*. La relación entre el paso de la retícula y el radio celular se lo expresa en la ecuación 31:

$$d = R\sqrt{3} \quad (31)$$

Y la superficie de la célula que viene a ser el área de un hexágono de lado  $d$  cuyo vértice inferior izquierdo es el centro de la célula viene dado por la ecuación 32: (Rábanos, 1998)

$$S_c = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2} \quad (32)$$



**Figura 44. Retícula de Planificación de una Célula Omnidireccional**

**Fuente:** (Rábanos, 1998)

La relación que se tiene que realizar es que las pérdidas obtenidas para el Downlink en el método de Okumura mediante las ecuaciones 26 y 27 van a ser igual que las pérdidas obtenidas del MAPL en CDMA y LTE para el Downlink.

Al igualar estos valores se obtienen las ecuaciones 33, 34 y 35.

$$L_{Path\_CDMA\_DOWN\_VOZ} = 86.7417 + 32.4348 \log d \text{ [dB]} = 148.8476 \text{ dB} \quad (33)$$

$$L_{Path\_CDMA\_DOWN\_DATOS} = 86.7417 + 32.4348 \log d \text{ [dB]} = 119.8051 \text{ dB} \quad (34)$$

$$L_{Path\_LTE\_DOWN} = 91.0555 + 32.4348 \log d = 139.1966 \text{ dB} \quad (35)$$

Cuando se igualan estos valores se procede a despejar el valor de la distancia, cuyos valores son los siguientes.

$$d_{Célula\_Downlink\_CDMA\_voz} = 82.1675 \text{ km}$$

$$d_{Célula\_Downlink\_CDMA\_datos} = 10.4594 \text{ km}$$

$$d_{Célula\_Downlink\_LTE} = 30.495 \text{ km}$$

Al reemplazar estos valores de la distancia de la ecuación 32 se obtiene el área de la célula de cada red.

$$A_{Célula\_Downlink\_CDMA\_voz} = 17540,9064 \text{ km}^2$$

$$A_{Célula\_Downlink\_CDMA\_datos} = 284,2269 \text{ km}^2$$

$$A_{Célula\_Downlink\_LTE} = 2416,21 \text{ km}^2$$

### 4.3. Cálculo de la Capacidad de la Red

#### 4.3.1. Cálculo de la Capacidad de la Red CDMA

##### *Tráfico*

La intensidad de tráfico instantánea es un conjunto de recursos (llamadas o conexiones de datos) ocupados en un tiempo dado. La unidad utilizada por la ITU-T es el Erlang en honor al matemático danés A. K. Erlang y es una medida adimensional. Dada la definición de la intensidad de tráfico podemos calcularlo en un determinado grupo de canales mediante la ecuación 36:

$$A = \frac{1}{T} \times \sum_{i=1}^n t_i \quad (36)$$

Dónde:

$A_v$ : Tráfico Total por canal (abonado)

$t_i$ : Tiempo de duración de la llamada

$T$ : Periodo de Observación

$n$ : Número total de ocupaciones en el grupo de canales.

Al calcular el tiempo promedio de las ocupaciones, entonces la ecuación 36 se reduce a la ecuación 37:

$$A = \frac{1}{T} \times (n \times t_m) \quad (37)$$

Dónde:

$t_m$ : Tiempo promedio de ocupación.

Al realizar el dimensionado práctico del tráfico de la red se deber tomar en cuenta los siguientes criterios:

- La forma en que se atiende el tráfico, es decir, si los equipos de conmutación trabajan, por ejemplo, como sistema de pérdida o como sistema de espera.
- Las características de la red de conmutación, es decir, la accesibilidad y la clase de mezcla.
- La calidad de tráfico requerida, o sea, el volumen de la pérdida o indicaciones sobre datos de espera.
- La clase de tráfico, es decir, las propiedades estadísticas del mismo.

**Sistemas de Pérdidas:** Se rechazan una ocupación ofrecida si la comunicación deseada no se puede establecer inmediatamente, debido a un bloqueo, recibiendo el abonado que llama la señal de ocupado.

**Sistema de Espera:** Puede mantenerse una ocupación ofrecida que no se pueda ser atendida inmediatamente debido a un bloqueo, hasta que se pueda establecer el enlace.

**Accesibilidad:** Es el rendimiento de un grupo de salida determinado esencialmente por la cantidad de líneas de salida del grupo que pueda alcanzarse, o sea, comprobarse en cuanto a su estado de ocupación (libres u ocupadas), desde una línea de entrada a través de la red de conmutación contemplada.

**Mezcla:** A fin de que la red de conmutación rinda el máximo posible, se asignan las líneas de salida del grupo a los subgrupos de entrada de forma tal, que pueden ayudarse entre sí ampliamente. El sistema de asignación empleado se designa como mezcla.

De acuerdo a estos criterios enunciados anteriormente para el diseño de la red se han planteado los siguientes valores esperados, según la División de Tráfico y Calidad de Servicio de CNT E.P. (antiguo ANDINATEL S.A.):

- Para el servicio de voz, se considera:

$$T = 60 \text{ minutos}$$

$$t_m = 3 \text{ minutos}$$

$$n = 1$$

Al reemplazar estos valores en la ecuación 37 se tiene en valor de  $A = 0.05 \frac{Erl}{Abonado}$ .

- Dentro de la División de Tráfico y Calidad de Servicio de CNT E.P., se ha realizado la siguiente observación respecto al tráfico para el servicio de Internet (Datos). Al observar que se trabaja con un total de 8E1s (240 circuitos o abonados) de Quito Centro utilizados en el COMAG ALCATEL (Centro de Operación, Mantenimiento y Gestión de la Red), obteniéndose el tráfico por circuito en las horas pico (Carga (Erl) / 240 Abonados). En la Tabla 30 podemos observar el tráfico que circula por los abonados en dicho sector por circuito.

**Tabla 30.**

**Medición del Tráfico por Abonado en las horas pico de los abonados del Sector Quito Centro por parte de la CNT E.P.**

<i>Horas Pico</i>	<i>Carga (Erl)</i>	<i>Tráfico (Erl/Abonado)</i>
<b>21H00</b>	135	0.5625
<b>22H00</b>	135	0.5666

**Fuente:** (Ordoñez & Parra, 2011).

Por lo que, al obtener un valor promedio entre estos valores de tráfico por abonado se tiene un valor de  $A = 0.5645 \frac{Erl}{Abonado}$ . En la práctica, se considera para el servicio de Internet una ocupación de mayor o igual a 10 minutos, en promedio se tiene para 30 minutos un tráfico por abonado de  $A = 0.2823 \frac{Erl}{Abonado}$  ya que en las mediciones realizadas por la CNT E.P. se calculó el tráfico por abonado en las horas pico, es decir, el  $t_m$  fue de 60 minutos.

Para calcular el tráfico total en la célula se debe tomar en cuenta a todos los usuarios que viven en las Comunidades del Milenio para cual se muestra en la Tabla 31 el total de habitantes que viven en dichas comunidades.

El tráfico ofrecido a una red es el que quiere ser causado por sí mismo, es decir, que el tráfico sea el mismo a lo largo de toda la red para lo cual se consideraría que la probabilidad de perdida fuese nula, y se la define en Erlangs.

**Tabla 31.**

**Número de Habitantes de las Comunidades del Milenio.**

<i>Comunidad</i>	<i>Número de Habitantes</i>
<b>Pañacocha</b>	860
<b>Playas de Cuyabeno</b>	392

**Fuente:** (Petroamazonas, 2013)

Con el número total de abonados se puede calcular el tráfico ofrecido el cual se puede calcular mediante la ecuación 38.

$$A_T = A \times X \quad (38)$$

Dónde:

$X$ : Número de Abonados (Campoverde, 2008).



Sin embargo, se requiere calcular la estimación de la Demanda Futura de los abonados mediante la ecuación 39.

$$D_f = D_o(1 + b)^n \quad (39)$$

Dónde:

$D_f$ : Demanda Final

$D_o$ : Demanda Inicial (Número de Habitantes actual)

$b$ : Incremento anual

$n$ : Número de Años del Proyecto

Según el Departamento de Planificación y Fiscalización de CNT E.P., el incremento anual del servicio en las zonas rurales corresponden al 1% y para el diseño de las redes se plantea un tiempo de actividad de la red de 10 años. Con esos datos se puede obtener la demanda final de la red y su correspondiente tráfico con el uso de las ecuaciones 38 y 39 respectivamente y los resultados se los puede visualizar en la Tabla 32.

**Tabla 32.**

**Cálculo de la Demanda Futura y del Tráfico Total de la Red.**

<i>Comunidad del Milenio</i>	<i>Demanda Inicial</i>	<i>Demanda Final</i>	<i>Tráfico Total</i>
<b>Pañacocha</b>	860	950	268.19 Erlangs
<b>Playas de Cuyabeno</b>	392	433	122.24 Erlangs

*Throughput*

El throughput dentro de cualquier sistema se le considera como la velocidad neta o real que fluye a través de una red por unidad de tiempo, por lo tanto es necesario realizar una estimación de la velocidad que puede llegar a tener el usuario tanto en la descarga de información como en la subida de información a la red.

En lo que se refiere al cálculo de la velocidad real o *throughput* en las redes de voz y datos cuyos usuarios se ubican a lo largo de la célula viene dado por la ecuación 40.

$$S = A_v \times v \times \alpha_r \quad (40)$$

Dónde:

$S$ : Throughput [bps]

$A_v$ : Intensidad de Tráfico por abonado [Erlangs/abonado]

$v$ : Tasa de Datos [bps] (voz = 9.6 kbps; Uplink = 153.6 kbps; Downlink = 2.4576 Mbps)

$\alpha_r$ : Factor de actividad de voz o datos (voz = 0.4; datos = 1) [adimensional] (CDMA University, 2010)

En base a los resultados obtenidos del tráfico por usuario en el apartado anterior se puede calcular el throughput para las redes de voz y datos.

Para la red de voz su cálculo es el siguiente:

$$S_{voz} = 9.6 \text{ kbps} \times 0.05 \frac{\text{Erlang}}{\text{usuario}} \times 0.4$$

$$S_{voz} = 192 \text{ bps}$$

Para la red de datos su cálculo se realizara para los dos enlaces, es decir, el enlace ascendente (reverso) como el descendente (directo) (Ordoñez & Parra, 2011).

$$S_{datos_{up}} = 153.6 \text{ kbps} \times 0.2823 \frac{\text{Erlang}}{\text{usuario}} \times 1$$

$$S_{datos_{up}} = 43.36128 \text{ kbps}$$

$$S_{datos_{down}} = 2.4576 \text{ Mbps} \times 0.2823 \frac{\text{Erlang}}{\text{usuario}} \times 1$$

$$S_{datos_{down}} = 693.78048 \text{ kbps}$$

### *Eficiencia Espectral*

La eficiencia espectral es el porcentaje de información útil que puede ser transmitida sobre un determinado ancho de banda en un determinado periodo de tiempo. En las redes móviles se le considera como el número de comunicaciones simultáneas con una determinada velocidad de transferencia o *throughput* que puede soportar la célula, el usuario o el entorno que desea realizarse la medición sobre el ancho de banda disponible (CDMA – 1.25 MHz y LTE – 15 MHz) que puede soportar cada tecnología móvil (Carvajal, 2009).

Para el cálculo de la eficiencia espectral tanto en el enlace descendente como en el enlace ascendente se realizara mediante la división entre el throughput obtenido de los dos enlaces dividido para el ancho de banda de la red y su fórmula se encuentra en las ecuaciones 41 y 42.

$$Spectral\ Efficiency_{CDMA_{Down}} = \frac{S_{datos_{down}}}{BW} \quad (41)$$

$$Spectral\ Efficiency_{CDMA_{Down}} = \frac{693.78048 \text{ kbps}}{1.25 \text{ MHz}} = 0.555 \text{ bits/s/Hz}$$

$$Spectral\ Efficiency_{CDMA_{Down}} = \frac{S_{datos_{up}}}{BW} \quad (42)$$

$$Spectral\ Efficiency_{CDMA_{Down}} = \frac{43.36128 \text{ kbps}}{1.25 \text{ MHz}} = 0.034689 \text{ bits/s/Hz}$$

Para el servicio de voz se requiere calcular la capacidad de la red de voz CDMA, es decir, el número de abonados que puede soportar la red. El número total de abonados que puede soportar una red celular CDMA viene dado por la siguiente ecuación 43.

$$N_{usuarios} = \frac{\frac{W}{R}}{\left(\frac{E_b}{N_o}\right) \times \alpha_r \times (1 + f)} \times L \quad (43)$$

Dónde:

$W$ : Ancho de Banda (1.25 MHz)

$R$ : Tasa de Datos (192 bps)

$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)$ : Relación de la Energía del Canal de Tráfico sobre la Densidad de Potencia de Ruido Térmico (4.9 dB)

$\alpha_r$ : Factor de actividad de voz (0.4)

$f$ : Factor de interferencia que representa la relación entre la potencia interferente de la célula adyacente con respecto a la potencia total de la señal recibida en los usuarios de la célula (para una red sectorizada por 3 antenas tiene un valor de 0.65)

$L$ : Factor de Carga de la Red (50%)

Al reemplazar estos valores en la ecuación (40) tendremos un total de 1007 usuarios (Etemad, 2004).

Para el cálculo de la eficiencia espectral se va a ocupar la ecuación 44 (Misra, 2013):

$$Spectral\ Efficiency_{CDMA_{Voz}} = N_{usuarios} \times \left(\frac{R}{W}\right) \quad (44)$$

$$Spectral\ Efficiency_{CDMA_{Voz}} = 1007 \times \left(\frac{192bps}{1.25MHz}\right)$$

$$Spectral\ Efficiency_{CDMA_{Voz}} = 0.154675\ bits/s/Hz$$

### 4.3.2. Cálculo de la Capacidad de la Red LTE

#### *Throughput*

Se va a realizar el cálculo del throughput teórico de las redes LTE para lo cual se utilizara como referencia la especificación 3GPP TS 23.216 (Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures).

Dentro del cálculo del Link Budget de las redes LTE se especificó la modulación a utilizar en la red. Para la siguiente consideración de diseño se ha escogido la especificación QPSK.

En la especificación 3GPP TS 23.216, se encuentra la Tabla 33 la cual nos muestra la relación entre el índice del MCS (Esquema de Modulación y Codificación) y el índice TBS (Tamaño del Bloque de Transporte) dentro de los canales PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) y PUSCH (Physical Uplink Shared Channel). El canal PDSCH es el principal canal de soporte de datos que asigna a los usuarios de forma dinámica y oportunista. El PDSCH transporta los datos en lo que se conoce como bloques de transporte (TB). El canal PUSCH transporta los datos de usuario. Es compatible con las modulaciones QPSK y 16 QAM (EETimes, 2014).

El orden de modulación  $Q_m$  que se va a ocupar para los enlaces descendente y ascendente es igual a 2, debido a la modulación QPSK. Para el enlace ascendente se utilizará un índice  $I_{TBS}$  de 9 mientras que para el enlace descendente se utilizara un índice de 5 (Keysight, 2014).

En la Tabla 34 nos muestra el número de bits que pueden transmitirse en una subtrama/TTI (Intervalo de Tiempo Transmitido) junto con el ancho de banda (número de Bloques de Recurso RB) que en el caso de nuestra red al tener un ancho de banda de 15 MHz en los enlaces descendente y ascendente será de 75. El tamaño del bloque de transporte dado en la Tabla 34 es después de haber considerado el control de la sobrecarga (overhead).

Tabla 33.

## Modulación y el Índice TBS para los canales PDSCH y PUSCH

Índice MCS $I_{MCS}$	Orden de Modulación $Q_m$	Índice TBS $I_{TBS}$
0	2	0
1	2	1
2	2	2
3	2	3
4	2	4
5	2	5
6	2	6
7	2	7
8	2	8
9	2	9
10	4	9
11	4	10
12	4	11
13	4	12
14	4	13
15	4	14
16	4	15
17	6	15
18	6	16
19	6	17
20	6	18
21	6	19
22	6	20
23	6	21
24	6	22
25	6	23
26	6	24
27	6	25
28	6	26
29	2	reservado
30	4	
31	6	

Fuente: (3GPP, 2014).

Tabla 34.

Tabla del Tamaño del Bloque de Transporte

$I_{TBS}$	$N_{PRB}$									
	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
0	1992	1992	2024	2088	2088	2088	2152	2152	2216	2216
1	2600	2600	2664	2728	2728	2792	2792	2856	2856	2856
2	3240	3240	3240	3368	3368	3368	3496	3496	3496	3624
3	4136	4264	4264	4392	4392	4392	4584	4584	4584	4776
4	5160	5160	5160	5352	5352	5544	5544	5544	5736	5736
5	6200	6200	6456	6456	6712	6712	6712	6968	6968	6968
6	7480	7480	7736	7736	7736	7992	7992	8248	8248	8248
7	8760	8760	8760	9144	9144	9144	9528	9528	9528	9912
8	9912	9912	10296	10296	10680	10680	10680	11064	11064	11064
9	11064	11448	11448	11832	11832	11832	12216	12216	12576	12576
10	12576	12576	12960	12960	12960	13536	13536	13536	14112	14112

Fuente: (3GPP, 2014).

Mediante el uso de estas dos tablas podemos determinar el número de bits de datos con la combinación del índice MCS y el número de Bloques de Recurso. Para el índice TBS igual a 9 (Downlink) tenemos el tamaño del bloque de transporte  $N_{PRB}$  igual a 11832, mientras que para el índice igual a 5 (Uplink) tenemos un  $N_{PRB}$  igual a 6712.

La fórmula para calcular el Throughput está determinada en la ecuación 45:

$$\text{Throughput} = \text{Número de Cadenas} \times N_{PRB} \quad (45)$$

El número de cadenas viene dado por el número de antenas instaladas para cada enlace. Para el enlace descendente se tiene 2 antenas (MIMO 2X2), mientras que para el enlace ascendente se tiene 1 antena (MIMO 1X2). Con estos valores podemos calcular el throughput en los dos enlaces (Rekhi, Luthra, Malik, & Atri, 2012).

$$TH_{LTE\_Downlink} = 23.664 \text{ Mbps}$$

$$TH_{LTE\_Uplink} = 6.712 \text{ Mbps}$$

### *Tráfico*

Al realizar el cálculo se debe tomar en cuenta que el dimensionamiento de la red de voz de las anteriores generaciones de telefonía móvil se basaba en la conmutación de circuitos, a diferencia de las redes LTE cuya comunicación de voz es mediante IP o también conocido como Voz sobre IP.

El tráfico en tiempo real, tales como Voz sobre IP (VoIP) tiene estrechas restricciones de retardo. Por tal motivo es importante establecer requisitos de capacidad del sistema para este tipo de servicios (un desafío particular en sistemas totalmente basados en paquetes, como LTE que se basan en la programación adaptativa).

El requisito de la capacidad del sistema se define como el número de usuarios de VoIP satisfechos, dado un modelo de tráfico particular y las restricciones de retardo. En ese modelo un usuario de VoIP se considera que está en interrupción (es decir, no satisfecho) si más del 2% de los paquetes de VoIP no llegan con éxito en el receptor de radio dentro de una latencia de 50 ms, y por lo tanto se le descarta. Esto supone un retardo global de extremo a extremo (desde el terminal móvil al terminal móvil) por debajo de los 200 ms. La capacidad del sistema de VoIP se le puede definir como el número de usuarios presentes por célula cuando se satisfacen a más del 95% de los usuarios.

Para el despliegue de la red LTE, un aumento progresivo de la demanda se logra cubrir al realizar un aumento progresivo de las estaciones base. Esto se puede simplificar que para unos valores del área de cobertura de una célula debería ser calculada mediante la ecuación 46.

$$\left( B \times \frac{E}{S} \right) = (U \times T) \quad (46)$$

Dónde:

$U$ : Densidad por Usuarios [usuarios/km<sup>2</sup>]



$T$ : Tráfico promedio por usuario [bits/s/usuario] (1 Mbps)

$B$ : Ancho de banda [Hz]

$E$ : Eficiencia Espectral [bits/s/Hz]

$S$ : Estación base cubre una superficie [ $\text{Km}^2$ ]

Para realizar el cálculo del tráfico que va a circular en las redes LTE se hará referencia a los valores promedio de la eficiencia espectral especificados por la organización 3GPP y se visualiza en la Tabla 35.

**Tabla 35.**

**Valores de la Eficiencia Espectral especificados por la 3GPP**

E-UTRAN – LTE			
<i>Tipo</i>	<i>Configuración de Antena</i>	<i>Enlace</i>	<i>Valor [bps/Hz]</i>
<b>Eficiencia Espectral Pico</b>	-	Downlink	15
<b>Eficiencia Espectral Promedio</b>	-	Uplink	3.75
<b>Eficiencia Espectral Pico</b>	2x2	Downlink	1.69
<b>Eficiencia Espectral Promedio</b>	1x2	Uplink	1.87

**Fuente:** (3GPP, 2011).

A continuación se procede a reemplazar los valores referentes a las Comunidades del Milenio de Pañacocha y Playas de Cuyabeno en la ecuación 46.

Para el caso de la Comunidad Pañacocha:

$$E = 15 \text{ bps/Hz}$$

$$15 \text{ MHz} \times \frac{15 \frac{\text{bps}}{\text{Hz}}}{805.2503 \text{ km}^2} = \frac{945 \text{ usuarios}}{0.145 \text{ km}^2} \times 1 \frac{\text{Mbps}}{\text{usuario}}$$

$$15 \text{ Mbps} \times 0.01863 = 6517.2413 \times 1 \text{ Mbps}$$

$$279.45 \text{ kbps} = 6.5724 \text{ Gbps}$$

$$E = 3.75 \text{ bps} / \text{Hz}$$

$$15 \text{ MHz} \times \frac{3.75 \frac{\text{bps}}{\text{Hz}}}{805.2503 \text{ km}^2} = \frac{945 \text{ usuarios}}{0.145 \text{ km}^2} \times 1 \frac{\text{Mbps}}{\text{usuario}}$$

$$15 \text{ Mbps} \times 0.004657 = 6517.2413 \times 1 \text{ Mbps}$$

$$69.855 \text{ kbps} = 6.5724 \text{ Gbps}$$

Para el caso de la Comunidad Playas de Cuyabeno

$$E = 15 \text{ bps/Hz}$$

$$15 \text{ MHz} \times \frac{15 \frac{\text{bps}}{\text{Hz}}}{805.2503 \text{ km}^2} = \frac{433 \text{ usuarios}}{0.145 \text{ km}^2} \times 1 \frac{\text{Mbps}}{\text{usuario}}$$

$$15 \text{ Mbps} \times 0.01863 = 2986.2069 \times 1 \text{ Mbps}$$

$$279.45 \text{ kbps} = 2.986 \text{ Gbps}$$

$$E = 3.75 \text{ bps} / \text{Hz}$$

$$15 \text{ MHz} \times \frac{3.75 \frac{\text{bps}}{\text{Hz}}}{805.2503 \text{ km}^2} = \frac{433 \text{ usuarios}}{0.145 \text{ km}^2} \times 1 \frac{\text{Mbps}}{\text{usuario}}$$

$$15 \text{ Mbps} \times 0.004657 = 2.986 \times 1 \text{ Mbps}$$

$$69.855 \text{ kbps} = 2.986 \text{ Gbps}$$

Para lograr un equilibrio referente al tráfico que circula a través de la red se debe mejorar el ancho de banda, la eficiencia espectral o reducir la cobertura de las estaciones base. Al realizar cualquiera de las tres mejoras antes mencionadas se puede llegar a disponer del equilibrio en la ecuación para el dimensionamiento del tráfico que va a soportar la red LTE (Manosalvas & Santamaría, 2012).

### *Eficiencia Espectral*

Para el caso de las redes LTE la eficiencia espectral será calculada en el borde de la célula debido a que es el peor de los escenarios dentro del diseño de las redes móviles. El borde de la célula está definido por el throughput requerido como dato inicial. La eficiencia espectral se deriva de las siguientes suposiciones.

- La sobrecarga (overhead) de los protocolos de capa 2 (MAC y RLC) es insignificante.
- La simulación del nivel de enlace no se toma en cuenta en la sobrecarga de la capa física debido a los canales de control.

Dado el throughput requerido en el borde de la célula, el throughput de la capa física se lo define en la ecuación 47.

$$\text{Layer 1 Throughput} = \frac{\text{Cell Edge Throughput}}{\text{Overhead Factor}} \quad (47)$$

Dónde:

$$\text{Overhead Factor} = \frac{\text{Data Symbol per Sub Frame}}{\text{Total Symbol per Sub Frame}} \quad (48)$$

Los valores de factor de sobrecarga (Overhead Factor) para Downlink y Uplink son 5/7 y 4/7 respectivamente, asumiendo un Prefijo Cíclico Corto (en un slot o ranura de 0.5 ms se pueden acomodar 6 símbolos).

De esta forma, el cálculo de la eficiencia espectral es mediante la ecuación 49:

$$\text{Spectral Efficiency} = \frac{\text{Layer 1 Throughput}}{\text{Cell Bandwidth}} \quad (49)$$

Reemplazando los valores del Overhead Factor en la ecuación 49 y tomando en cuenta que el Ancho de Banda de la Célula es de 15 MHz tenemos las ecuaciones 50 y 51 (Basit, 2009):

$$Spectral\ Efficiency_{Downlink} = \frac{Cell\ Edge\ Throughput_{DL}/_{5/7}}{15\ MHz} \quad (50)$$

$$Spectral\ Efficiency_{Uplink} = \frac{Cell\ Edge\ Throughput_{UP}/_{4/7}}{15\ MHz} \quad (51)$$

Los valores del Throughput para los enlaces descendente y ascendente se calculan en base de los valores de la Tabla 36.

**Tabla 36.**

**Throughput de los enlaces Downlink y Uplink para una red LTE 700 MHz para un entorno Suburbano**

<i>Enlace</i>	<i>Throughput en el Borde de la Célula</i>
<b>Downlink</b>	512 kbps
<b>Uplink</b>	128 kbps

**Fuente:** (ZTE, 2013)

Al reemplazar estos valores en las ecuaciones 50 y 51 se obtienen los valores de la eficiencia espectral.

$$Spectral\ Efficiency_{Downlink} = 0.0478\ bits/s/Hz$$

$$Spectral\ Efficiency_{Uplink} = 0.014933\ bits/s/Hz$$

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS DE INTEROPERABILIDAD, MERCADO Y DESEMPEÑO DE LAS REDES**

#### **5.1. Análisis de los KPI (Key Performance Indicators)**

Para la optimización de la red de radio (o para cualquier optimización de cualquier red) es necesario haber definido cuales van a ser los Indicadores Claves de Desempeño (Key Performance Indicator - KPI). Estos KPIs son parámetros que permiten observar de cerca el proceso de monitoreo de la red que se desea optimizar. De hecho, el termino KPI se utiliza para determinar los parámetros relacionados a los canales de voz y datos, pero el rendimiento de la red puede ser caracterizado en términos generales en los criterios de cobertura, capacidad y calidad también que cubren los aspectos de voz y datos (Mishra, 2004).

##### **5.1.1. Redes CDMA EV-DO**

En base a los parámetros KPI los operadores llevan a cabo las mediciones de los servicios de la red EVDO. Esto permite a los Ingenieros de Red optimizar el rendimiento del sistema y mejorar la calidad del servicio. Estos KPIs se clasifican de acuerdo a las áreas de desempeño de la red, es decir, Gestión de Sesiones (entre la red de acceso y el terminal del usuario), Configuración de las Llamadas, Handoff y los parámetros relacionados a la capacidad/throughput de la red de datos. Cada una de estas áreas tiene número de parámetros para medir su desempeño. Los KPIs más importantes que son utilizados por la mayoría de los operadores de redes móviles son:

*Porcentaje de Configuración de Sesiones Exitosas (SSSR):* Se lo define mediante la ecuación 52:

$$SSSR = \left( \frac{\text{Número de Configuraciones de Sesión Exitosas}}{\text{Número Total de Solicitudes de Configuraciones de Sesión}} \right) \times 100 \quad (52)$$

*Porcentaje de Configuración de Conexiones Exitosas (CSSR):* Relaciona la configuración de conexiones/llamadas con los parámetros de rendimiento. Se lo define mediante la ecuación 53:

$$CSSR = \left( \frac{\text{Número de Conexiones Exitosas}}{\text{Número Total de Solicitudes de Conexión}} \right) \times 100 \quad (53)$$

*Porcentaje de Llamadas Bloqueadas:* También posee la misma relación que la CSSR. La configuración de las llamadas la inicia ya sea la red de acceso o el terminal del usuario. Se lo define mediante la ecuación 54:

$$\text{Porcentaje de Llamadas Bloqueadas} = \left( \frac{\text{Número de Llamadas Bloqueadas}}{\text{Número Total de Llamadas}} \right) \times 100 \quad (54)$$

*Porcentaje de Llamadas Caídas:* Posee la relación que tienen tanto el CSSR y el porcentaje de llamadas bloqueadas. Se lo define mediante la ecuación 55:

$$\text{Porcentaje de Llamadas Caídas} = \left( \frac{\text{Número de Llamadas Caídas}}{\text{Número Total de Llamadas}} \right) \times 100 \quad (55)$$

*Porcentaje de Transferencias (Soft Handoff) Exitosas:* Relaciona los parámetros de rendimiento del handover. Generalmente se lo define mediante la ecuación 56 (Anwar & Ahmed, 2012):

$$\text{Porcentaje de Transferencias Exitosas} = \left( \frac{\text{Número Total de Transferencias}}{\text{Intentos Totales de Transferencias}} \right) \times 100 \quad (56)$$

### 5.1.2. Redes LTE

En una red móvil es necesario definir indicadores y métricas para permitir caracterizar el estado de la red y para identificar posibles problemas ya que dentro de una red LTE no es una excepción.

Existen indicadores de rendimiento básicos para el análisis de desempeño de la red LTE, donde algunos pueden ser comparables a las tecnologías anteriores (UMTS) y otros son característicos de LTE.

De acuerdo con el 3GPP, hay cinco categorías diferentes de clasificar los KPI: por accesibilidad; por retenibilidad o retención, por integridad; por disponibilidad y por movilidad.

Los KPIs propuestos son presentados a través de una breve descripción del indicador y de los problemas típicos que pueden surgir de las fallas o rechazos de los mensajes relacionados con estos indicadores. También se enumeran los posibles efectos de los problemas descritos y la mejor manera de obtener estos indicadores.

#### *Accesibilidad*

Con el fin de proporcionar servicios al usuario es necesario establecer una conexión de red. Si el servicio no puede ser ofrecido al usuario este se refleja en una pérdida de facturación, lo que lleva a una creciente insatisfacción por el usuario y finalmente la pérdida del cliente.

Por lo tanto es necesaria la existencia de indicadores que permitan evaluar el acceso a la red y a los servicios, por lo que se definen los KPIs de accesibilidad. Estos sólo deben ser considerados aquellos que resultan de la contribución al acceso a la red E-UTRAN, que debe ser medido como un porcentaje de éxito de las operaciones. En la Tabla 37 podemos observar los KPIs de accesibilidad más importantes.

Tabla 37.

**KPIs de Accesibilidad.**

<i>KPI de Accesibilidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Problemas Típicos</i>	<i>Efectos</i>	<i>Medición</i>
<b>EPS Attach Success Rate</b>	Porcentaje entre el enganchamiento exitoso al sistema EPS y de todas los intentos realizados.	Problemas en el proceso de acceso aleatorio (cuando el UE se engancha a la red por primera vez y se realiza la búsqueda del mismo) o el establecimiento de una conexión RRC.	La terminal de usuario no consigue registrarse en la red y no puede utilizar cualquier servicio	Es preferible el uso de <i>drive test</i> que significa la medición de las redes móviles a través de un automóvil. Puede ser que del lado de la red móvil no estén registradas todas las tentativas de enganchamiento.
<b>RRC Connection Establishment Success Ratio</b>	Porcentaje entre las conexiones a la RRC exitosas y de todos los intentos realizados	Potencia de la señal bien baja, alta interferencia, problemas en el acceso aleatorio.	La terminal de usuario se mantiene en estado de reposo y sin acceso al servicio solicitado.	
<b>Random Access Process Success Ratio</b>	Porcentaje entre los accesos aleatorios bien realizados y todos los intentos realizados	Cobertura Insuficiente, nivel de elevada interferencia, problemas de movilidad.	Puede llevar a fallas en el restablecimiento de las conexiones al RRC. Fallas en el Handover.	
<b>Default EPS Bearer Establishment Success Ratio</b>	Porcentaje entre la asignación correcta de la portadora EPS por defecto y el número total de asignaciones en la misma portadora.	Problemas en el acceso aleatorio, Cobertura deficiente, elevada interferencia.	Como una portadora EPS no es atribuida el usuario no tiene dirección IP por lo que no se engancha a la red de datos.	
<b>Dedicated EPS Bearer Establishment Success Ratio</b>	Porcentaje entre la asignación correcta de las portadoras EPS dedicadas y el número total de asignaciones de todas esas portadoras.	Recursos Insuficientes, errores en los identificadores de red, servicios de las operadoras no pueden ser soportados.	El servicio correspondiente a la portadora dedicada no es atribuido al terminal de usuario, por lo que no existen garantías en el QoS.	

**Fuente:** (Nunes, 2012)



### *Retención*

Cuando el usuario accede a un servicio este debe estar activo durante todo el tiempo de utilización, sin embargo es posible que existan interrupciones o caídas de servicio. Para evaluar el impacto de estas acciones y del rendimiento de la red es necesario definir KPIs referentes a la retención de la conexión.

Los KPIs de retención deben ser medidos solo cuando existe una caída en las conexiones de datos no esperada o cuando se presenta una caída de parte del operador. En la Tabla 38 se presentan algunos tipos de indicadores de retención.

**Tabla 38.**

#### **KPIs de Retención**

<i>KPI de Retención</i>	<i>Descripción</i>	<i>Problemas Típicos</i>	<i>Efectos</i>	<i>Medición</i>
<b>Number of Radio Link Failures</b>	Contabiliza el número de veces en las cuales existe una falla en el enlace de radio dependiendo de los parámetros especificados.	Bajo Nivel de la Señal RSRQ (Calidad Recibida de la Señal Recibida), elevada interferencia, problemas en el acceso aleatorio	La terminal de usuario pasa al estado de reposo y el flujo de datos es interrumpido.	A través del drive test o por las estadísticas de la red.
<b>EPS Cut-Off Ratio</b>	Porcentaje entre el número de portadoras EPS desactivadas de manera no explícita y la totalidad de portadoras EPS asignadas.	Reactivación de la portadora, errores en la red.	Cuando una portadora dedicada es desactivada el terminal de usuario deja de tener servicio.	

**Fuente:** (Nunes, 2012)

### *Integridad*

Esta medida de desempeño permite al operador evaluar la calidad de las conexiones ofrecidas. Además de eso el servicio a analizar deberá revisar la entrega

de los paquetes IP. Es bien conocido que la calidad de la conexión tiene una influencia directa en la satisfacción del usuario, es decir, si la velocidad de transferencia de datos es muy baja o la latencia es demasiado alta resultan ser indeseables pudiendo estar en valores por debajo del servicio contratado.

De esa forma, son necesarios los KPIs de integridad que permitan conocer el estado de calidad de las conexiones establecidas. En caso de presentar problemas en la red es deber del operador presentar soluciones con el fin de mejorar el QoS. Algunos de estos KPIs se los puede visualizar en la Tabla 39.

**Tabla 39.**

**KPIs de Integridad.**

<i>KPI de Retención</i>	<i>Descripción</i>	<i>Problemas Típicos</i>	<i>Efectos</i>	<i>Medición</i>
<b>Cell-Specific Load</b>	Es la relación entre el número de recurso alojados en la red y el número total de recursos.	Se debe una carga elevada en la célula por un gran número de usuarios que ocupan el servicio de datos de alta capacidad.	El control de admisión rechaza nuevas conexiones, disminuye la calidad existente y se cancelan las conexiones activas.	La carga de una célula se la obtiene mediante estadísticas de la red.
<b>Throughput</b>	Velocidad de datos real, ya sea en un determinado usuario o en toda la red.	Cuando el throughput es bajo se debe a múltiples causas como la calidad de la señal, la carga elevada de la red, las características del terminal, problemas de movilidad, restricciones de la red de distribución de datos que ofrece baja capacidad en la red.	A menor throughput, menor es la calidad de servicio ya que este KPI tiene gran importancia en el desempeño general de la red.	Las velocidades de datos del usuario se lo pueden obtener a través de drive test o por estadísticas de la red. Mientras que el tráfico de las células solo puede ser obtenido mediante las estadísticas.
<b>Modulation and Coding Scheme</b>	Las modulaciones y codificaciones utilizadas.	Si el MCS es de bajo orden se tendrá un bajo MCS en el receptor. Además de que existen problemas de movilidad	Una MCS baja tiene un impacto directo en el throughput. Esto produce bajas velocidades de datos.	A través del drive test o por las estadísticas de la red.

**Fuente:** (Nunes, 2012)

### *Disponibilidad*

Si la red de acceso no se encuentra activa es imposible que el operador realice la facturación de cualquier servicio. La indisponibilidad del servicio tiene un impacto muy significativo en la satisfacción del cliente y de la oferta de servicios.

De esta manera son definidos los indicadores de disponibilidad que reflejen el porcentaje de tiempo en que las células están activas. Algunos de estos indicadores se pueden observar en la Tabla 40.

**Tabla 40.**

#### **KPIs de Disponibilidad.**

<i>KPI de Disponibilidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Problemas Típicos</i>	<i>Efectos</i>	<i>Medición</i>
<b>Cell Availability</b>	Porcentaje de tiempo que una célula permite el acceso radio mínimo por un tiempo de medición definido,	Fallas de Energía, problemas en los equipos.	Imposibilidad de ofrecer servicio, caídas en la facturación de la red.	A través del drive test o por las estadísticas de la red.
<b>Network Availability</b>	Porcentaje de tiempo que un grupo de células permite el acceso radio mínimo por un tiempo de medición definido,			

**Fuente:** (Nunes, 2012)

### *Movilidad*

Se debe tomar en cuenta que la Red LTE es una red móvil y es necesario que existan mediciones referentes al desempeño del terminal de usuario en movimiento, en particular de los handovers efectuados y de cómo actúan.

Los efectos que tienen los KPIs de movilidad son similares a los KPIs de retención, es decir, si existen fallas en la conexión a la red de datos, esto se reflejará

en el QoS y en la satisfacción del cliente. Sin embargo, es necesario tener en cuenta su diferenciación con los KPIs de retención pues se originan de problemas distintos. En la tabla 41 se presentan los KPIs de movilidad más importantes.

**Tabla 41.**

**KPIs de Movilidad.**

<i>KPI de Movilidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Problemas Típicos</i>	<i>Efectos</i>	<i>Medición</i>
<b>Number of Handovers</b>	Contabiliza el número de handovers.	La cantidad de handovers depende del: área de las células, nivel de la señal, movilidad, parámetros del handover.	Pueden provocar retrasos en el envío de los paquetes de datos, además los handovers consumen recursos de señalización	Puede ser medido a través de drive test o mediante estadísticas de la red.
<b>Ping-Pong Handover Ratio</b>	El porcentaje de los handovers del tipo ping-pong, es decir, de aquellos handover que se cruzan entre sí por un mismo terminal de usuario y del número total de handovers.	El número elevado de este tipo de handovers se debe a que el handover es demasiado rápido.	Se consumen recursos de señalización.	
<b>Time in the Best Cell</b>	Se define como el porcentaje de tiempo que el terminal de usuario entre una célula con la mejor señal.	Si el tiempo del handover resulta ser alto este tiempo se vuelve más bajo.	Cuando el tiempo es bajo se utilizan identificadores que no estén ligados a las estaciones base con un Path Loss muy alto, lo que provoca una alta interferencia en la red.	
<b>Handover Delay</b>	Contabiliza el tiempo que el terminal de usuario no está conectado a la red durante el proceso de handover.	El retraso depende típicamente de los problemas en el acceso aleatorio.	Cuanto mayor es la interrupción, mayor es la degradación en el QoS.	

**Fuente:** (Nunes, 2012)

## 5.2. Interoperabilidad de la Red CDMA 450 MHz con la red LTE 700 MHz

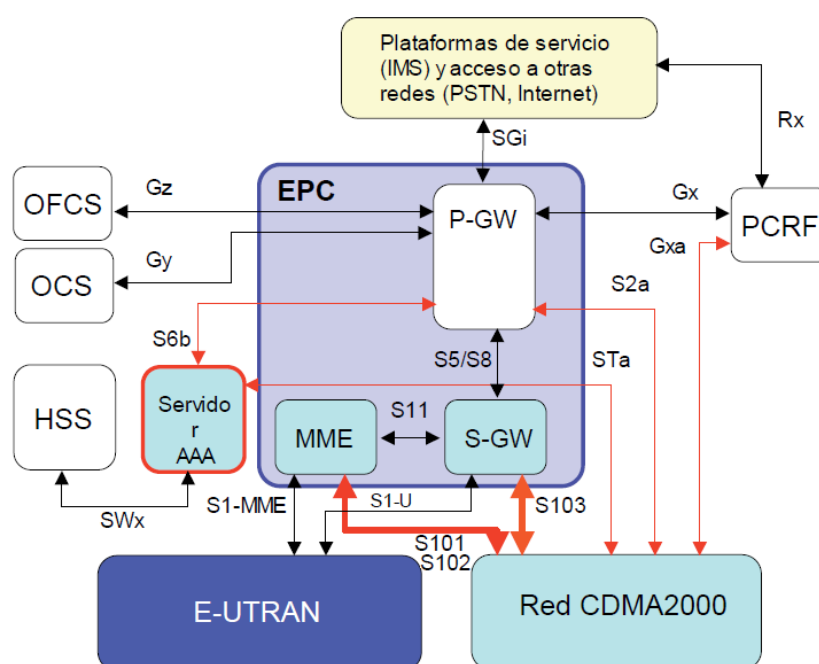
Se han realizado múltiples esfuerzos a fin de conseguir la solución que permita el funcionamiento o *interworking* de las redes CDMA y LTE. Sin embargo, este proceso el cual permita el funcionamiento de las redes de acceso LTE en las redes CDMA tiene que realizarse de manera gradual con el objetivo de garantizar el servicio de ambas redes.

La solución más adecuada para la interconexión de las redes CDMA2000 EV-DO y las redes LTE es la tecnología eHRPD (Evolved High Rate Packet Data) el cual representa una evolución de la tecnología HRPD que permite disponer de altas velocidades de datos en las redes CDMA2000 EV-DO con la particularidad que esta tecnología permite a los proveedores de servicios introducir elementos de la arquitectura SAE/EPC. En la Figura 45 se puede observar la arquitectura que permite la interconexión de las redes CDMA2000 EV-DO y LTE.

Para proporcionar la interconexión entre LTE y CDMA, 3GPP define un número de interfaces adicionales en la arquitectura EPC. Las interfaces S101, S102, S103 son únicas para las redes CDMA y se utilizan para proporcionar un rendimiento óptimo durante el handover.

La interfaz 101 se la considera como una interfaz de control ya que permite la transferencia de señalización de registro y de preparación del handover entre redes. Cuando el terminal está enganchado a la red CDMA2000, esta interfaz permite la señalización de registro en E-UTRAN mediante la transferencia de la señalización NAS (Non-Access Stratum) pertinente que se envía de forma encapsulada entre la MME y la red de acceso de la red CDMA2000 a través del enlace radio CDMA2000, Este tipo de señalización tiene como funciones principales la autenticación, autorización, gestión de movilidad de los terminales y gestión de los servicios portadores de la red EPS. Cuando se realiza este registro de una red a otra se la

denomina pre-registro y se puede realizar en ambas direcciones. El objetivo del pre-registro es reducir al mínimo el tiempo de interrupción del servicio ocasionado por un procedimiento de traspaso.



**Figura 45. Solución de la Interconexión de las redes CDMA2000 EV-DO y LTE**

**Fuente:** (Agusti, Francisco, Casadevall, & Ferrús, 2010)

La interfaz S102 que se ubican entre el MME y la red CDMA2000 se utiliza para soportar los servicios de voz en las redes CDMA 1xRTT (University of Alberta, 2012).

La interfaz S103 permite realizar el envío del tráfico de usuario entre la pasarela S-GW y la red eHRPD durante la realización del handover. Esta interfaz permite minimizar la pérdida de paquetes durante el proceso de handover mediante el envío de los paquetes IP del usuario que pudieran quedar retenidos en la pasarela S-GW hacia la red de acceso destino.

Existen otros campos dentro de la interconexión de las redes CDMA y LTE que se abarcan en dicha solución. Se han introducido campos y procedimientos específicos en los protocolos RRC utilizados en el plano de control de la interfaz de radio de los sistemas 3GPP. Por ejemplo, el protocolo RRC incorpora mensajes específicos de información de sistema con datos de células CDMA2000 vecinas, mensajes de configuración y envío de medidas relativas a esta tecnología, así como mensajes para ordenar la realización del handover a una célula CDMA2000 específica. Al introducir estos procedimientos en el protocolo RRC permite que el handover se controle desde la red (Agusti, Francisco, Casadevall, & Ferrús, 2010).

### **5.3. Análisis de Mercado**

La población rural se encuentra ubicada en su gran mayoría en lugares alejados de las grandes concentraciones urbanas y sus pueblos se encuentran dispersos entre sí. Al encontrarse alejados de las zonas urbanas no les permite estar conectados a las redes de telecomunicaciones instaladas en las grandes ciudades, por lo que se requiere implementar redes inalámbricas que permitan la comunicación de sus habitantes al resto de comunidades y sobre todo al mundo entero.

Las redes CDMA450 y APT LTE 700 permiten cubrir grandes distancias mediante la instalación de un número menor de radiobases lo que resulta factible su operación en zonas donde a diferencia de las zonas urbanas se requiere disponer de conectividad permanente y con velocidades de transferencia de datos promedio.

Según estudios realizados por la ITU se indica que muchos de los problemas que existen en las zonas rurales no se pueden solucionar únicamente mediante la instalación de redes de telecomunicaciones ya que exigen una coordinación de los programas de electrificación, desarrollo de red de transporte, enseñanza y capacitación en las zonas rurales. La radiodifusión y la telefonía de voz de línea fija son tradicionalmente los principales servicios proporcionados al reducido número de

personas que viven en zonas rurales y tienen acceso a las telecomunicaciones. Desde hace poco, la telefonía móvil es fundamental para mejorar este acceso y en algunas economías su penetración es superior a la de las líneas fijas (ITU, 2014).

Sin embargo, al disponer de Unidades Educativas del Milenio, Centros de Salud, Infocentros y Estaciones de Policía en cada una de las comunidades se requiere disponer de servicio de Internet de Banda Ancha comparable con las velocidades de datos ofrecidas en el sector urbano.

Según los datos del Censo de Población y Vivienda realizado por el INEC en el año 2010 se han realizado las estadísticas de la población sobre los diversos parámetros: Disponibilidad de Teléfono Convencional y Disponibilidad de Internet. Estos parámetros nos servirán para el análisis de las poblaciones de Pañacocha y Cuyabeno referentes a la penetración de las redes de telecomunicaciones en dichas comunidades.

En las Tablas 42 y 43 se observan la medición de dichos parámetros en las parroquias de Pañacocha y Cuyabeno.

**Tabla 42.**

**Disponibilidad de Teléfono Convencional en las parroquias de Pañacocha y Playas de Cuyabeno.**

<i>Parroquias</i>	<i>Casos</i>	<i>Disponibilidad</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
<b><i>Pañacocha</i></b>	4	Si	2.27
	172	No	97.73
<b><i>Cuyabeno</i></b>	86	No	100.00

**Fuente:** (INEC, 2014)



**Tabla 43.****Disponibilidad de Internet en las parroquias de Pañacocha y Playas de Cuyabeno.**

<i>Parroquias</i>	<i>Casos</i>	<i>Disponibilidad</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
<b><i>Pañacocha</i></b>	176	No	100.00
<b><i>Cuyabeno</i></b>	2	Si	2.33
	84	No	97.67

**Fuente:** (INEC, 2014)

Según la estadística realizada por el INEC de las Tecnologías de la Información y Comunicación TICs del año 2013 el Acceso al Internet según el área rural ha tenido un repunte en su porcentaje. En la zona rural el crecimiento fue de 7.8 puntos llegando a un total de 9.1 % de toda la población rural del Ecuador. El uso de la telefonía fija a nivel nacional ha tenido un incremento en su porcentaje con respecto al año 2010 del 38.5% al 39.6%. Mientras que el uso de la telefonía móvil a nivel tuvo un gran repunte tomando como referencia el año 2010 al subir del 49.7% al 86.4% (INEC, 2014).

Esta referencia resulta ser válida en las Comunidades del Milenio debido a las redes HSPA+ existentes en la zona, lo que permite tener un mayor número de habitantes conectados a las redes móviles de voz y datos.

### **5.3.1. CDMA 450 MHz Rev. 0**

Según estudios realizados a finales del año 2013 las redes CDMA 450 tienen un gran nivel de aceptación a lo largo de Sudamérica. Argentina, Belice, Chile, Ecuador, México, Perú, Surinam y Venezuela tienen implementadas sus redes CDMA 450 dentro de sus zonas rurales.

Existe un total de 15 operadores de telecomunicaciones a lo largo de América Latina y el Caribe que tienen operando sus redes CDMA 450 de manera comercial. Estos operadores tienen desarrollados diversas redes CDMA en sus países de origen y mediante la Tabla 44 podemos visualizar las tecnologías ofrecidas en dichos países.

**Tabla 44.**

**Desarrollo de la tecnología CDMA 450 a lo largo de América Latina y el Caribe**

<i>Región Geográfica</i>	<i>América Latina - Caribe</i>
<b>Operadores</b>	15
<b>Países</b>	8
<b>Redes Comerciales 1X</b>	15
<b>Redes Comerciales 1x EV-DO Rel. 0</b>	1
<b>Redes Comerciales 1x EV-DO Rel. A</b>	2
<b>Redes en Desarrollo 1X</b>	6
<b>Redes en Desarrollo 1x EV-DO Rel. 0</b>	1
<b>Redes en Desarrollo 1x EV-DO Rel. A</b>	4

**Fuente:** (CDG, 2014)

Las empresas de telecomunicaciones que facilitan la infraestructura de estas redes a lo largo de la región son las siguientes:

- *Huawei*: Argentina, Ecuador, México, Perú, Venezuela.
- *Airwalk*: Argentina
- *ZTE*: Argentina, Chile, México, Perú, Venezuela
- *Ericsson*: Belice
- *Alcatel – Lucent*: México, Surinam.

Además existen en total 198 modelos de dispositivos CDMA 450 disponibles en 32 proveedores de servicios de telecomunicaciones a lo largo del mundo. Estos terminales tienen un costo promedio de \$ 25 lo cual su precio es comparativo a los terminales GSM. Como se puede observar en la Tabla 45 tenemos el total de

modelos de dispositivos que existen en el mercado relacionados a la tecnología que tienen operativo en cada uno de estos artefactos.

**Tabla 45.**

**Número de Modelos de Dispositivos Móviles CDMA 450 con su respectiva Tecnología.**

<i>Tecnología de la Red CDMA 450</i>	<i>Número de Modelos de Dispositivos Móviles</i>
<b>CDMA2000 1X</b>	125
<b>CDMA2000 1x EV-DO Rel. 0</b>	21
<b>CDMA2000 1x EV-DO Rel. A</b>	45
<b>CDMA2000 1x EV-DO Rel. B</b>	7

**Fuente:** (CDG, 2013)

### **5.3.2. APT LTE 700 MHz**

La migración mundial de la Televisión Terrestre Analógica a la Digital permite un uso mucho más eficiente del espectro de Ultra Alta Frecuencia (UHF), creando así un dividendo digital. Por las razones descritas anteriormente este espectro es ideal para la banda ancha móvil.

Se han realizado numerosos estudios que intentan cuantificar los beneficios económicos y sociales de la asignación de espectro del dividendo digital a la banda ancha móvil. Algunos de estos aspectos más destacados incluyen:

- Incremento de US\$1 Trillón al PIB (Producto Interno Bruto) en el año 2020 atribuido a la asignación del dividendo digital en la región de Asia y el Pacífico.
- Crecimiento de los ingresos por impuestos a un valor de US\$ 215 mil millones
- Creación de 1.4 millones de nuevas empresas

- Creación de 2.7 millones de nuevos empleos

Además, la investigación sobre el impacto de la banda ancha en general también demuestra importantes beneficios sociales y económicos, incluyendo:

- Por cada 1.000 suscriptores de banda ancha adicionales, se crean alrededor de 80 nuevos puestos de trabajo.
- Un aumento del 10% en los resultados de penetración de banda ancha (Ericsson, 2014)

La adopción de la tecnología APT LTE 700 Banda 28 ha sido constante en los últimos años y en los últimos tiempos ha crecido rápidamente. Los mercados que han adoptado o aprobado el plan de APT LTE 700 incluyen:

- *Asía Pacífico:* Afganistán, Australia, Bangladesh, Nueva Zelanda, Japón, Pakistán, India, Papua Nueva Guinea, Taiwán, Corea del Sur, Nepal, Tonga, Sri Lanka, Brunei, Indonesia, Malasia, Maldivas y Singapur.
- *América:* Brasil, Costa Rica, Colombia, Argentina, Perú, Chile, República Dominicana, México, Ecuador, Panamá, Venezuela y Uruguay (GSA, 2014).

Dentro de los planes estratégicos de penetración de la red APT LTE 700 para la adopción rápida y generalizada en América Latina fue la adopción formal de México de este plan durante el año 2012. Con una población de más de 116 millones de personas México es el tercer país más poblado de adoptar el plan después de la India y Japón.

El mercado potencial que tiene actualmente la tecnología APT LTE 700 es 8 veces superior que el que apoya el plan LTE USA 700 MHz, lo que implica que el plan APT LTE 700 tendrá mayores economías de escala lo que es muy probable que se fabriquen dispositivos a un precio razonable para el beneficio de los consumidores y facilitará el roaming internacional (ITU, 2012)

#### **5.4. Análisis Comparativo entre redes CDMA y LTE**

Como parte inicial de este análisis comparativo se tiene que definir a las tecnologías CDMA y LTE. CDMA es una tecnología de acceso múltiple que se utiliza en las redes móviles de tercera generación mientras que LTE es uno de los estándares en las comunicaciones móviles de cuarta generación.

Al hablar un poco sobre la asignación del espectro tenemos la ventaja de las redes CDMA las cuales pueden trabajar con un ancho de banda de 1.25 MHz dentro de sus redes CDMA2000 y CDMA2000 EV-DO. Las redes LTE pueden trabajar con anchos de banda que van desde 1.4 MHz hasta 20 MHz, dependiendo de las asignaciones de espectro a las que estén reguladas en cada territorio o país. Al disponer de un mayor ancho de banda permite que el usuario tenga mayores velocidades de datos en los enlaces ascendente como descendente. Todo esto es factible ya que al disponer de un mayor ancho de banda se incrementa los bloques de recurso en LTE y permite obtener mayores velocidades de transferencia.

El objetivo de las operadoras de telecomunicaciones es ofrecer los servicios Triple Play, es decir, los servicios de voz, datos y video. Las redes CDMA2000 EV-DO Rev. 0 por su velocidad promedio permite disponer de los servicios de voz y datos a baja velocidad, mientras que en las redes LTE son consideradas como redes de datos de alta velocidad por lo que es factible observar videos incluso de alta definición.

Las redes CDMA2000 EV-DO pueden trabajar al mismo tiempo con las redes CDMA2000 1X, cuyas redes se encuentran desplegadas mediante la tecnología CDMA 450 a lo largo de las poblaciones rurales del Ecuador. La red CDMA 450 permite entregar el servicio de telefonía fija inalámbrica lo que permite conectarse a las redes fijas y móviles del país sin tener que invertir mayor infraestructura. Esto permite que el usuario disponga de tarifas económicas al realizar llamadas de voz

hacia cualquier destino. Mientras que LTE debe implementar soluciones para el servicio de voz como VoLTE (Voice over LTE), cuyo sistema se base en la red del Subsistema Multimedia IP (IMS). Este sistema no es lo suficientemente robusto como para que los operadores apuesten por él (Ati, 2011). Además el consumo de energía en VoLTE es muy elevado a comparación de las tecnologías CDMA2000 1X y GSM.

Las tecnologías de acceso del enlace descendente para las redes CDMA2000 y LTE son OFDMA y CDMA respectivamente. La tecnología OFDMA ofrece mayores ventajas que la tecnología CDMA como es su resistencia al desvanecimiento, mediante el uso del prefijo cíclico puede ser totalmente resistente a la dispersión del retardo multitrayecto y es el sistema más adecuado para MIMO. Sin embargo, existen desventajas de este sistema como su sensibilidad a los errores de frecuencia y al ruido de fase, la interferencia generada en la célula sobre todo en el borde y su nivel de implementación es mayor con respecto al sistema CDMA (Efnusev, Stojanovska, & Dinov, 2010).

Los sistemas CDMA emplean antenas direccionas en sus estaciones base. Estas antenas simplemente transmiten la señal a través de su patrón de cobertura, independientemente de la ubicación del usuario. Esto reduce la cobertura de la célula y se genera un desperdicio en la potencia de la estación base. Las redes LTE disponen de tecnologías que permiten optimizar la señal de radio como las Antenas Inteligentes y los sistemas MIMO que permiten optimizar la potencia generada por las antenas transmisoras mediante el uso del downtilt eléctrico o inclinación del patrón de la antena y transmiten su señal dependiendo de la ubicación del usuario.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

Las redes LTE ofrecen mejores capacidades de servicios de datos que las redes CDMA, pero debido a su limitada cobertura permite que las redes CDMA deban ser utilizadas como complemento a la prestación de servicios de datos.

En la planificación de la cobertura radioeléctrica en entornos rurales se utilizó el Método Determinístico de Deygout siempre y cuando se disponga de cartografía rural de la zona de despliegue de la red. Los resultados aseguran los niveles de porcentaje de tiempo y ubicaciones en un 50%. Sin embargo, cuando no se disponga de la cartografía precisa en la zona de servicio, es posible utilizar métodos empíricos como Okumura – Hata para zonas rurales.

La modulación y codificación adaptativa que tienen estas dos redes varían mucho respecto al entorno del canal y a las peticiones que genere el dispositivo móvil respecto a la velocidad de datos que desea transmitir. Si las condiciones del canal son las mejores se dispondrá de un mayor throughput, caso contrario se procede a reducir el índice de modulación y las velocidades serán menores.

El principal problema del método de Deygout es el nivel de interferencia que llegaría a tener en ciertas poblaciones donde se dispone de las señales de televisión abierta UHF, sobre todo en las zonas fronterizas donde receptan incluso canales de televisión de los países vecinos.

La modulación QPSK tiene mayor ventaja que las modulaciones de orden superior debido a la buena recuperación de la señal de radio en aquellos sitios donde existe una pobre calidad de señal. La recepción de la señal puede verse disminuida en las Comunidades del Milenio y sus alrededores por el clima (precipitaciones durante todo el año) y por la fauna del sector (bosques cuyos árboles tienen 30 – 40 m de altura). Por tal motivo se requiere disponer de una modulación que permita tener una buena recepción de la señal en todo momento y por tal motivo se ha escogido la modulación QPSK.

La red CDMA 450 dispone de mayores prestaciones sobre todo en el aspecto económico. Debido al desarrollo de dicha red a lo largo del país su costo es menor a diferencia de la red APT 700 LTE cuyo equipamiento requiere mayor inversión tanto a nivel de infraestructura de red como en los terminales de usuario.

Según el Plan Nacional de Banda Ancha ejecutado por el Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información se requiere disponer de al menos un ancho de banda de 2 Megabits por segundo en el enlace descendente por lo que la red APT LTE de 700 MHz es la opción más viable para ofrecer dichas velocidades. Sin embargo, la red LTE requiere de soluciones costosas en lo que se refiere a servicios de voz. De esta manera se concluye que la red CDMA 450 es la red más fiable para ofrecer los servicios de voz y datos de baja velocidad como fase inicial en la implementación de las redes de voz pero se puede dejar sentadas las bases para una implementación a corto o mediano plazo de la red APT LTE 700 MHz.

## **6.2. Recomendaciones**

Como las redes CDMA y LTE trabajan con distintas bandas de frecuencias se requiere invertir en ambas tecnologías por separado ya que no existen módulos de Radio Frecuencia que operen en las bandas de 450 MHz y 700 MHz. Sin embargo las dos redes pueden utilizar la misma unidad de banda base (BBU). Este enfoque



tiene dos ventajas. La primera es la reutilización de los equipos de transmisión. La segunda es que al disponer de distintas unidades de Radio Frecuencia y diversos sistemas de alimentación eléctrica permite optimizar por separado a las redes CDMA y LTE, sobre todo en el downtilt y los ángulos azimuth de las antenas.

Es recomendable que cada Comunidad disponga de los servicios básicos a fin de poder instalar las radiobases que otorgaran los servicios de voz y datos en dichas poblaciones, además de disponer de las redes de fibra óptica que mediante tuberías o líneas de flujo puedan ser transportadas hacia cada comunidad. Sin embargo, existen todas esas facilidades técnicas dentro de algunas Estaciones de Extracción Petrolífera lo que facilita la instalación de los equipos de telecomunicaciones en dichas áreas.

Es preferible realizar el diseño de las redes CDMA y LTE es en aquellas localidades que se encuentren circundantes a las comunidades del milenio y a la vez dentro de las Zonas Protegidas por el Gobierno ya que no existe otra infraestructura o red de telecomunicaciones lo que facilita la implementación de las redes móviles por su baja o nula interferencia con otras señales.

La baja disponibilidad de dispositivos que puedan operar la tecnología APT LTE 700 y el alto costo de éstos cuando lleguen al mercado afectarán la utilización de esa banda. Por lo que se recomienda a los fabricantes de terminales móviles la fabricación de dispositivos de bajo costo que estén dentro de las especificaciones técnicas de la red APT LTE 700 MHZ para el uso masivo de dicha tecnología.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3GPP. (21 de Octubre de 2011). Obtenido de sitio web de 3GPP:  
[http://www.3gpp.org/ftp/information/presentations/presentations\\_2011/2011\\_09\\_LTE\\_Asia/2011\\_LTEAsia\\_3GPP%20RAN.pdf](http://www.3gpp.org/ftp/information/presentations/presentations_2011/2011_09_LTE_Asia/2011_LTEAsia_3GPP%20RAN.pdf)
- 3GPP. (26 de Agosto de 2014). Obtenido de sitio web de 3GPP:  
<http://www.3gpp.org/DynaReport/36213.htm>
- 3GPP2. (16 de Abril de 2002). Obtenido de sitio web de ARIB:  
[http://www.arib.or.jp/IMT-2000/ARIB-STD/ITU-R/ARIB\\_STD-T64-C.S0033-0.pdf](http://www.arib.or.jp/IMT-2000/ARIB-STD/ITU-R/ARIB_STD-T64-C.S0033-0.pdf)
- Abu-Rgheff, M. A. (2007). *Introduction to CDMA Wireless Communications*. Elsevier Editorial.
- Agusti, R., Bernardo, F., Casadevall, F., Ferrús, R., Pérez, J., & Sallent, O. (2010). LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles. En R. Agusti, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez, & O. Sallent, *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles* (págs. 241-244; 251-252). Barcelona: Fundación Vodafone España.
- Agusti, R., Bernardo, F., Casadevall, F., Ferrús, R., Pérez, J., & Sallent, O. (2010). LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles. En R. Agusti, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez, & O. Sallent, *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles* (págs. 241 - 244). Barcelona: Fundación Vodafone España.
- Agusti, R., Francisco, B., Casadevall, F., & Ferrús, R. (2010). *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. Madrid: Fundación Vodafone España.
- Aliaga, W. (24 de Septiembre de 2011). Obtenido de sitio web del Repositorio Digital de la Pontificia Universidad Católica de Perú:  
[http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/995/ALIAGA\\_ALIAGA\\_WALTER\\_CDMA\\_450MHZ\\_JUNIN.pdf?sequence=1](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/995/ALIAGA_ALIAGA_WALTER_CDMA_450MHZ_JUNIN.pdf?sequence=1).
- Anwar, R., & Ahmed, I. (30 de Julio de 2012). Obtenido de sitio web de AIRCC Publishing Corporation:  
<http://airccse.org/journal/ijdps/papers/0712ijdps21.pdf>

- Aptica. (23 de Julio de 2010). Obtenido de sitio web de Xirio Online:  
<http://www.xirio-online.com/help/es/Deygout.html>
- Aptica. (7 de Julio de 2010). Contenido de Ayuda de Sirenet. Madrid, Madrid, España.
- APTICA. (12 de Diciembre de 2013). Obtenido de sitio web de APTICA:  
[http://aptica.es/pdf/es/Folleto\\_Sirenet.pdf](http://aptica.es/pdf/es/Folleto_Sirenet.pdf)
- Asqui, A. (9 de Noviembre de 2010). Obtenido de sitio web del Repositorio Digital de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE:  
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/207>
- Ati, H. (8 de Abril de 2011). Obtenido de sitio web del Repositorio de la EPN:  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/3738>
- Basit, A. (27 de Febrero de 2009). Obtenido de sitio web del Helsinki University of Technology: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100056.pdf>
- Bushan, N., Lott, C., Black, P., & Attar, R. (08 de Febrero de 2006). Obtenido de sitio web del Computer Science and Engineering (CSE):  
<http://www.cse.unt.edu/~rakl/class5540/BLB06.pdf>
- Campoverde, M. (19 de Febrero de 2008). Obtenido de sitio web del Repositorio de la EPN: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/906>
- Carvajal, H. (23 de Octubre de 2009). Obtenido de sitio web del Repositorio Digital de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE:  
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/191>
- CDG. (1 de Junio de 2006). Obtenido de sitio web de CDG:  
[http://www.cdg.org/news/events/cdmaseminar/06\\_latinam/LARC%20PRESO/Thurs/8-Carlos%20Killian%20.pdf](http://www.cdg.org/news/events/cdmaseminar/06_latinam/LARC%20PRESO/Thurs/8-Carlos%20Killian%20.pdf)
- CDG. (02 de Junio de 2013). Obtenido de sitio web de CDG:  
<http://www.cdg.org/worldwide/index.asp>
- CDG. (18 de Diciembre de 2013). Obtenido de sitio web de CDG:  
[https://www.cdg.org/resources/files/fact\\_sheets/CDMA450%20Market%20Facts\\_Spanish.pdf](https://www.cdg.org/resources/files/fact_sheets/CDMA450%20Market%20Facts_Spanish.pdf)

CDG. (9 de Septiembre de 2014). Obtenido de sitio web de CDG:

[http://www.cdg.org/resources/cdma\\_stats.asp](http://www.cdg.org/resources/cdma_stats.asp)

CDMA University. (04 de Abril de 2010). Obtenido de sitio web de 4shared:

[http://www.4shared-china.com/office/RkhDj\\_4F/80-W1527-2\\_RevC\\_CDMA2000\\_1x\\_an.html](http://www.4shared-china.com/office/RkhDj_4F/80-W1527-2_RevC_CDMA2000_1x_an.html)

Cisco. (2009). *IP Design for Mobile Networks*. Indianapolis: Cisco Press.

CNT EP. (26 de Junio de 2011). Obtenido de sitio web de CNT EP:

[http://soy.cnt.com.ec/index.php?option=com\\_content&view=article&id=708:notiinfo&catid=55:notiinfopubl&Itemid=33](http://soy.cnt.com.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=708:notiinfo&catid=55:notiinfopubl&Itemid=33)

CNT EP. (2012). Obtenido de sitio web de CNT EP:

[http://www.cnt.gob.ec/cntwebregistro/04\\_cntglobal/productos\\_detalle.php?txtCodiSegm=1&txtCodiLine=2&txtCodiProd=123&txtCodiTipoMovi=1](http://www.cnt.gob.ec/cntwebregistro/04_cntglobal/productos_detalle.php?txtCodiSegm=1&txtCodiLine=2&txtCodiProd=123&txtCodiTipoMovi=1)

CNT EP. (17 de Octubre de 2013). Obtenido de sitio web de CNT EP:

<https://www.cnt.gob.ec/index.php/categoria-noticias/743-red-movil-4g-de-cnt-una-nueva-experiencia-que-une-mas-al-ecuador>

CNT EP. (5 de Mayo de 2014). Obtenido de sitio web de CNT EP:

<http://www.cnt.gob.ec/index.php/categoria-noticias/1142-red-hspa-de-cnt-ep-en-el-orient-ecuadoriano>

CNT EP. (01 de Junio de 2014). Obtenido de sitio web de Coberturas de CNT EP:

<http://gis.cnt.com.ec/apppublico/>

CONATEL. (20 de Diciembre de 2006). Obtenido de sitio web del CONATEL:

<http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/11/2006-CONATEL-33-677.pdf>

CONATEL. (26 de Junio de 2008). Obtenido de sitio web del CONATEL:

<http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/11/2008-CONATEL-GEN-12-331.pdf>

CONATEL. (27 de Enero de 2010). Obtenido de sitio web del CONATEL:

[http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/030\\_01\\_conatel\\_2010.pdf](http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/030_01_conatel_2010.pdf)

- CONATEL. (21 de Junio de 2012). Obtenido de sitio web del CONATEL:  
[http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/tel\\_268\\_11\\_conatel\\_2012.pdf](http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/tel_268_11_conatel_2012.pdf)
- CONATEL. (4 de Mayo de 2012). Obtenido de sitio web del CONATEL:  
[http://www.conatel.gob.ec/site\\_conatel/files/bandaanchaenecuador2011.pdf](http://www.conatel.gob.ec/site_conatel/files/bandaanchaenecuador2011.pdf)
- CONATEL. (24 de Enero de 2012). Obtenido de sitio web del CONATEL:  
[http://www.conatel.gob.ec/site\\_conatel/images/stories/resolucionesconatel/2011/TEL-886-23-CONATEL-2011.pdf](http://www.conatel.gob.ec/site_conatel/images/stories/resolucionesconatel/2011/TEL-886-23-CONATEL-2011.pdf)
- CONATEL. (20 de Enero de 2013). Obtenido de sitio web del CONATEL:  
[http://www.conatel.gob.ec/site\\_conatel/images/stories/resolucionesconatel/2012/TEL-804-29-CONATEL-2012\\_.pdf](http://www.conatel.gob.ec/site_conatel/images/stories/resolucionesconatel/2012/TEL-804-29-CONATEL-2012_.pdf)  
[http://www.conatel.gob.ec/site\\_conatel/images/stories/resolucionesconatel/2012/TEL-804-29-CONATEL-2012\\_.pdf](http://www.conatel.gob.ec/site_conatel/images/stories/resolucionesconatel/2012/TEL-804-29-CONATEL-2012_.pdf)
- CONATEL. (01 de Junio de 2013). Obtenido de sitio web del CONATEL:  
[http://www.conatel.gob.ec/site\\_conatel/index.php?option=com\\_content&view=article&catid=278:estadisticas-telefonía-movil&id=671:infraestructura-del-sector-de-telefonía-movil](http://www.conatel.gob.ec/site_conatel/index.php?option=com_content&view=article&catid=278:estadisticas-telefonía-movil&id=671:infraestructura-del-sector-de-telefonía-movil)
- Cox, C. (2012). *An Introduction to LTE LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Dalhman, E., Parkvall, S., & Skold, J. (2011). *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Oxford: Elsevier Editorial.
- Ecuador Inmediato. (12 de Septiembre de 2007). Obtenido de sitio web de Ecuador Inmediato:  
[http://ecuadorinmediato.com/index.php?module=Noticias&func=news\\_user\\_view&id=60427&umt=suptel\\_pide\\_informacion\\_a\\_movistar\\_y\\_porta\\_sobre\\_retiro\\_operacion\\_tecnologia](http://ecuadorinmediato.com/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=60427&umt=suptel_pide_informacion_a_movistar_y_porta_sobre_retiro_operacion_tecnologia)
- Ecuador Inmediato. (08 de 10 de 2011). Obtenido de sitio web de Ecuador Inmediato:  
[http://www.ecuadorinmediato.com/index.php?module=Noticias&func=news\\_user\\_view&id=159356&umt=jefe\\_estado\\_afirma\\_que\\_primeras\\_comunidades\\_del\\_milenio\\_estaran\\_listas\\_en\\_2012](http://www.ecuadorinmediato.com/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=159356&umt=jefe_estado_afirma_que_primeras_comunidades_del_milenio_estaran_listas_en_2012)

- EEQ. (4 de Julio de 2012). Obtenido de sitio web de la EEQ:  
<http://ftp.eeq.com.ec/upload/empresas-publicas-eficientes/Cultura%20Empresarial/Xavier%20Pe%F1aherrera%20-%20CNT%20EP.pdf>
- EETimes. (26 de Agosto de 2014). Obtenido de sitio web de EETimes:  
[http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1278199](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1278199)
- Efnusev, I., Stojanovska, V., & Dinov, L. (23 de Noviembre de 2010). Obtenido de sitio web del ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET Univerzitetu u Beogradu:  
[http://2010.telfor.rs/files/radovi/TELFOR2010\\_03\\_20.pdf](http://2010.telfor.rs/files/radovi/TELFOR2010_03_20.pdf)
- Ericsson. (24 de Febrero de 2014). Obtenido de sitio web de Ericsson:  
<http://www.ericsson.com/res/docs/2013/ericsson-apt700-creating-a-truly-global-band.pdf>
- ETAPA. (14 de Abril de 2014). Obtenido de sitio web de ETAPA:  
[http://www.etapa.net.ec/Telecomunicaciones/tel\\_telfij\\_cob\\_act.aspx](http://www.etapa.net.ec/Telecomunicaciones/tel_telfij_cob_act.aspx)
- ETAPA. (14 de Abril de 2014). Obtenido de sitio web de ETAPA:  
[http://www.etapa.net.ec/Telecomunicaciones/tel\\_telfij\\_cob\\_act\\_1.aspx](http://www.etapa.net.ec/Telecomunicaciones/tel_telfij_cob_act_1.aspx)
- Etemad, K. (2004). *CDMA 2000 EVOLUTION: System Concepts and Design Principles*. John Wiley & Sons Editorial.
- Gerard, M. (2004). *VSAT Networks*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Gobierno Autónomo Descentralizado de Pastaza. (11 de Marzo de 2013). Obtenido de sitio web del Gobierno Autónomo Descentralizado de Pastaza:  
[http://www.pastaza.gob.ec/planes/resumen\\_plan\\_ord\\_desarrollopdf/download](http://www.pastaza.gob.ec/planes/resumen_plan_ord_desarrollopdf/download)
- GSA. (5 de Marzo de 2014). Obtenido de sitio web de GSA:  
[http://www.gsacom.com/downloads/pdf/John\\_Giusti\\_EricssonAPT700Forum\\_260214.php4](http://www.gsacom.com/downloads/pdf/John_Giusti_EricssonAPT700Forum_260214.php4)
- Holma, H., & Toskala, A. (2010). *WCDMA FOR UMTS HSPA Evolution and LTE*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Huagra Ñaupá. (9 de Noviembre de 2010). *sitio web de Huagra Ñaupá*. Obtenido de <http://huagra.blogspot.com/2010/11/cuyabeno-esta-amenazada-por-sus.html>

- INEC. (09 de Septiembre de 2014). Obtenido de sitio web del INEC:  
<http://redatam.inec.gob.ec/cgibin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPV2010&MAIN=WebServerMain.inl>
- INEC. (16 de Mayo de 2014). Obtenido de sitio web del INEC:  
[http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_Sociales/TIC/Resultados\\_principales\\_140515.Tic.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Sociales/TIC/Resultados_principales_140515.Tic.pdf)
- ITU. (25 de Abril de 2009). Obtenido de sitio web del ITU:  
[https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/oth/06/0F/T060F00600C0075PPTS.ppt+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=ec](https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/06/0F/T060F00600C0075PPTS.ppt+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=ec)
- ITU. (22 de Octubre de 2012). Obtenido de sitio web de ITU:  
<http://www.itu.int/md/R12-ITURSEM.COSTARICA-SP-0009/es>
- ITU. (12 de Julio de 2013). Obtenido de sitio web del ITU:  
<http://www.itu.int/en/ITU-R/workshops/regional/RRS-13-Americas/Documents/Forum/RRS-13-Americas-03-ANATEL-Brazil.pdf>
- ITU. (09 de Septiembre de 2014). Obtenido de sitio web de ITU:  
<https://www.itu.int/itu-news/manager/display.asp?lang=es&year=2004&issue=05&ipage=globalAgenda&ext=html>
- Keysight. (28 de Agosto de 2014). Obtenido de sitio web de Keysight:  
[http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/n7624b/Content/RT/RT\\_UL-SCH\\_Settings.htm](http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/n7624b/Content/RT/RT_UL-SCH_Settings.htm)
- Korowajczuk, L., De Souza, B., & Moreira, A. (2004). Designing cdma2000 Systems. En L. Korowajczuk, *Designing cdma2000 Systems* (págs. 15-19). West Sussex: John Wiley & Sons.
- LTE University. (18 de Julio de 2012). Obtenido de sitio web de LTE University:  
[http://lteuniversity.com/ask\\_the\\_expert/f/59/t/3479.aspx](http://lteuniversity.com/ask_the_expert/f/59/t/3479.aspx)
- Manosalvas, H., & Santamaría, A. (07 de Julio de 2012). Obtenido de sitio web del Repositorio Digital de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE:  
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/5547>

- Ministerio de Recursos Naturales No Renovables. (25 de Abril de 2013). Obtenido de sitio web de Ministerio de Recursos Naturales No Renovables:  
[http://www.recursosnaturales.gob.ec/wp-content/uploads/2013/04/revista\\_\\_\\_1\\_\\_\\_MRNNR\\_\\_up.pdf](http://www.recursosnaturales.gob.ec/wp-content/uploads/2013/04/revista___1___MRNNR__up.pdf)
- Ministerio de Telecomunicaciones de la República de Colombia. (22 de Agosto de 2007). Obtenido de sitio web del Ministerio de Telecomunicaciones de la República de Colombia:  
<http://archivo.mintic.gov.co/mincom/documents/portal/documents/root/Prese-ntacioneseLACWilliamPedraza.pdf>
- Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información. (2 de Octubre de 2013). Obtenido de sitio web de Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información: <http://www.telecomunicaciones.gob.ec/mintel-doto-de-conectividad-a-unidad-educativa-del-milenio-cuyabeno/>
- Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información. (14 de Enero de 2014). Obtenido de sitio web del Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información:  
<http://www.telecomunicaciones.gob.ec/panacocha-comunidad-del-milenio-cuenta-con-tecnologia-de-punta/?s=cuyabeno>
- Ministerio del Ambiente. (17 de Octubre de 2007). Obtenido de sitio web de Scribd:  
<http://es.scribd.com/doc/229039007/Reserva-Cuyabeo-Minambiente>
- Mishra, A. (2004). *Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Misra, I. (2013). *Wireless Communications and Networks*. Puducherry: McGraw Gill Education.
- Muñoz, S. (24 de Febrero de 2006). *sitio web del Repositorio Digital de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/1003>
- Nedevschi, S., Surana, S., & Du, B. (6 de Noviembre de 2006). Obtenido de sitio web de la Universidad Berkeley:  
<http://tier.cs.berkeley.edu/docs/wireless/cdma450.pdf>



- Nunes, J. (29 de Octubre de 2012). Obtenido de sitio web del Repositório Científico del Instituto Científico de Lisboa:  
<http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/2181>
- Ordoñez, F., & Parra, R. (1 de Marzo de 2011). Obtenido de sitio web del Repositorio de la EPN: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2779>
- Petroamazonas. (28 de Diciembre de 2011). Obtenido de sitio web de Petroamazonas: <http://es.scribd.com/doc/169880757/Panacocha-Documento-Fibra-Optica>
- Petroamazonas. (22 de Febrero de 2013). Obtenido de sitio web de Petroamazonas: <http://www.petroamazonas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/10/rendicion-cuentas-informe-gestion-2012-actualizacion-anual1.pdf>
- Petroamazonas. (25 de Mayo de 2014). *sitio web de Petroamazonas*. Obtenido de <http://www.petroamazonas.gob.ec/>
- Phone Scoop. (8 de Agosto de 2012). Obtenido de sitio web de Phone Scoop: <http://www.phonescoop.com/glossary/term.php?gid=355>
- Presidencia de la República del Ecuador. (24 de Mayo de 2014). *sitio web de Flickr*. Obtenido de <https://www.flickr.com/photos/presidenciaecuador/10054578263/>
- QUALCOMM. (14 de Octubre de 2003). Obtenido de sitio web de 3GPP2: <ftp://ftp.3gpp2.org/TSGC./Working/2003/2003-10-Kobe/TSG-C-2003-10-Kobe/WG3/C30-20031013-209%20QCOM%20Results%20Rev.%20A%20Link%20budget.pdf>
- Rábanos, J. M. (1998). *Comunicaciones Móviles*. Madrid: Editorial Universitaria Ramon Areces.
- Rekhi, K., Luthra, M., Malik, S., & Atri, R. (01 de Diciembre de 2012). Obtenido de sitio web de Slideshare: <http://es.slideshare.net/veermalik121/throughput-calculation-for-lte-tdd-and-fdd-system>
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (1 de Febrero de 2013). Obtenido de sitio web de la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo:

<http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/05/Proyectos-de-Inversi%C3%B3n-P%C3%ABlica-en-Sucumb%C3%ADos.pdf>

SENATEL. (9 de Junio de 2014). Obtenido de sitio web de la SENATEL:  
<http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/gobierno-ecuadoriano-negociara-la-concesion-de-bandas-de-frecuencia-para-4g/>

SENATEL. (2014). Obtenido de sitio web de la SENATEL:  
<http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/consulta-plan-nacional-de-frecuencias/>

SENATEL. (20 de Mayo de 2014). Obtenido de sitio web de la SENATEL:  
<http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=7176&force=1>

Sesia, S., & Toufik, I. (2009). *LTE - The UTMS Long Term Evolution from Theory to Practice*. John Wiley & Sons Editorial.

SUPERTEL. (21 de Mayo de 2009). Obtenido de sitio web de Slideshare de la SUPERTEL: <http://www.slideshare.net/PatoJ/presentacin-3g>

SUPERTEL. (4 de Febrero de 2010). Obtenido de sitio web de la SUPERTEL:  
[http://www.supertel.gob.ec/pdf/estadisticas/historico\\_moviles\\_94\\_2008.pdf](http://www.supertel.gob.ec/pdf/estadisticas/historico_moviles_94_2008.pdf)

SUPERTEL. (22 de Diciembre de 2011). Obtenido de sitio web de la SUPERTEL:  
[http://supertel.gob.ec/index.php?option=com\\_content&view=article&id=277:marco-legislativo&catid=66&Itemid=38](http://supertel.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=277:marco-legislativo&catid=66&Itemid=38)

SUPERTEL. (02 de Junio de 2013). Obtenido de sitio web de la SUPERTEL:  
[http://www.supertel.gob.ec/index.php?option=com\\_content&view=article&id=214:cdma-450&catid=61:articulos-recomendados&Itemid=311](http://www.supertel.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=214:cdma-450&catid=61:articulos-recomendados&Itemid=311)

Telecom Funda. (04 de Marzo de 2012). Obtenido de sitio web de TelecomFunda:  
<http://telecomfunda.com/forum/attachment.php?s=2400917fd7b46d668fd7cf84d78aebdc&attachmentid=15075&d=1385107221>

Telecommunications Industry Association TIA. (27 de Julio de 1998). Obtenido de sitio web de TIA:

[http://www.tiaonline.org/standards/technology/documents/TR455\\_RTT\\_V18.pdf](http://www.tiaonline.org/standards/technology/documents/TR455_RTT_V18.pdf)

Telesemana. (23 de Octubre de 2012). Obtenido de sitio web de Telesemana:  
<http://www.telesemana.com/blog/2012/10/19/ecuador-adopto-canalizacion-asia-pacifico-para-la-banda-de-700-mhz/>

Third Generation Partnership Project 2 3GPP2. (7 de Junio de 2007). *sitio web del 3GPP2*. Obtenido de [http://www.3gpp2.org/public\\_html/specs/s.r0005-b\\_v2.0\\_070521.pdf](http://www.3gpp2.org/public_html/specs/s.r0005-b_v2.0_070521.pdf)

University of Alberta. (26 de Abril de 2012). Obtenido de sitio web de University of Alberta:  
[http://ece.engineering.ualberta.ca/en/Graduate/~media/ece/Graduate/Documents/GradDocs/Intro\\_to\\_\\_Evolved\\_packet\\_core\\_network.pdf](http://ece.engineering.ualberta.ca/en/Graduate/~media/ece/Graduate/Documents/GradDocs/Intro_to__Evolved_packet_core_network.pdf)

Zaki, Y. (2012). *Future Mobile Communications: LTE Optimization*. Bremen: Editorial de la Universidad de Bremen.

ZTE. (09 de Agosto de 2013). Obtenido de sitio web de GSM Association:  
<http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2013/07/ZTE-LTE-APT-700MHz-Network-White-Paper-ZTE-June-2013.pdf>

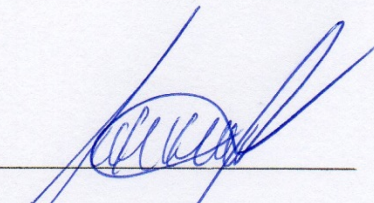
ZTE Corporation. (22 de Mayo de 2014). Obtenido de sitio web de academia.edu:  
[http://www.academia.edu/7120852/3\\_CDMA\\_Link\\_Budget](http://www.academia.edu/7120852/3_CDMA_Link_Budget)

Zyren, J. (15 de Junio de 2007). Obtenido de sitio web de element14 Community:  
<http://www.element14.com/community/servlet/JiveServlet/previewBody/13380-102-1-42319/3GPPEVOLUTIONWP.pdf>

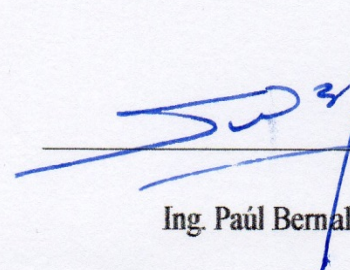
## ACTA DE ENTREGA

El proyecto de grado titulado "ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE BANDA ANCHA PARA OFRECER SERVICIOS DE VOZ Y DATOS EN LAS COMUNIDADES DEL MILENIO" fue entregado en el Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Sangolquí, a 7 de Noviembre de 2014

  
Juan Alexis Vega Ayo

C.I.: 172278171-1

  
Ing. Paúl Bernal



DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES