



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UNA RED LTE BASADO EN  
TÉCNICAS DE MÚLTIPLES ANTENAS MIMO Y DE AGREGACIÓN  
DE SEGUNDA PORTADORA, EN UN ESCENARIO CON ALTA  
DENSIDAD DE TRÁFICO”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

Previo a la obtención del Título de:

**MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**

JORGE ROBERTO HOYOS ZAVALA  
ANGEL GUSTAVO NAULA ZHONGOR

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios, a quien le debo todo en la vida.*

**Jorge Hoyos Zavala**

*A Dios, por haberme concedido siempre lo necesario:*

*Familia, amigos, salud y Camila.*

**Angel Naula Zhongor**

## DEDICATORIA

*Dedicado a mis hijas Amanda y Bárbara.*

*Sin ellas, no valdría el esfuerzo.*

**Jorge Hoyos Zavala**

*Dedicado a mis padres, ejemplos de: sacrificio, esfuerzo y valentía.*

*Sin sus consejos, no habría rumbo cierto en mi vida*

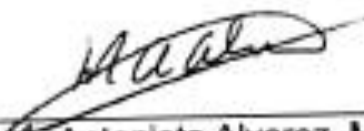
**Angel Naula Zhongor**

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



---

Miguel Yapur, M.Sc.  
DECANO DE FIEC



---

María Antonieta Alvarez, M.Sc.  
DIRECTORA DE TRABAJO DE TITULACIÓN



---

César Yépez, M.Sc.  
MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual".



---

Ing. Jorge Foyos Zavala



---

Ing. Angel Neula Zhongel

## **PREFACIO**

El presente documento, que forma parte de los requisitos de graduación del programa profesional de Maestría en Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación de la ESPOL, tiene como objetivo principal describir la tecnología MIMO aplicado a la telefonía móvil LTE, desde un punto de vista sistémico y práctico que permita profundizar los conocimientos en esta área a través de un análisis descriptivo del funcionamiento de técnicas de transmisión de datos en diferentes tipos de escenarios.

El desarrollo de este trabajo ha permitido identificar las características fundamentales de estas tecnologías, los parámetros cambiantes dentro del proceso de planificación y optimización de la red y las consideraciones que deben tener operadores, suscriptores, entidades de control, empresas de telecomunicaciones y público en general sobre la implementación de redes LTE.

Las conclusiones y recomendaciones de este estudio están enmarcadas para la planificación de nuevas redes y la optimización de las ya implementadas y puede servir de guía para futuros trabajos en el desarrollo de estrategias que permitan mejorar la percepción de calidad de los suscriptores con respecto a los servicios ofrecidos por los operadores.

## RESUMEN

Tras algunos años de funcionamiento, la tecnología LTE en Ecuador ha encontrado cierto grado de madurez operativa, por lo que es indispensable recurrir a herramientas de estudio que pongan a prueba los conocimientos teóricos sobre el comportamiento de estas redes bajo ciertas condiciones de operación, y así establecer comparaciones con los resultados esperados y realizar propuestas de mejoramiento o de mitigación de riesgos operativos.

En este sentido, el presente proyecto de titulación tiene como objetivo analizar el desempeño de una red LTE utilizando técnicas de mejoramiento de señal en un escenario de alta densidad de tráfico de datos móviles para determinar su rendimiento y proponer acciones que permitan alcanzar los niveles requeridos.

El primer capítulo se presenta el marco referencial de este trabajo, describiendo el problema de investigación y su justificación, los objetivos planteados, así como la metodología, los resultados esperados y elementos diferenciadores del estudio.

El segundo capítulo describe el estado del arte de LTE, en donde se repasa la evolución de esta tecnología, los componentes básicos de la red, la arquitectura y principios de funcionamiento de las tecnologías de nivel físico. MIMO, que es una técnica utilizada en redes de telecomunicaciones para mejorar el desempeño de la red también se revisa en este capítulo y se repasan sus conceptos básicos detallando las técnicas de transmisión que se aplican a LTE. Para completar este estudio y poder establecer parámetros de mejora en el desempeño de estas redes, se incluye la técnica de agregación de portadora para redes avanzadas LTE.

El tercer capítulo consiste en el detalle de la planificación de una red LTE en la herramienta de simulación ATOLL, en donde se especifican los elementos básicos de simulación, las funcionalidades de la herramienta para la planificación y optimización de

estas redes y la configuración de sus parámetros, el entorno geográfico y los escenarios de análisis para la predicción.

En el cuarto capítulo, se describen los resultados obtenidos en los diferentes escenarios, proponiendo además consideraciones para la implementación y mejoramiento en el desempeño de redes LTE en un contexto que incluye el estudio de las radiaciones no ionizantes generados por LTE, proyección de crecimiento de la tecnología, los indicadores de calidad de servicio y el plan de acción para mejorarlos.

Al final de estos capítulos se exponen las conclusiones del estudio y las recomendaciones a seguir para la aplicación de las técnicas mostradas en este documento, además de las líneas futuras de investigación que llevarían a una ampliación de los conocimientos aquí expuestos que pueden derivar a otros resultados.



## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
DECLARACIÓN EXPRESA .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
PREFACIO .....	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL .....	viii
ABREVIATURAS .....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xviii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xxi
INTRODUCCIÓN.....	xxiii
CAPÍTULO 1.....	1
1. MARCO REFERENCIAL .....	1
1.1. Descripción de la investigación.....	1
1.2. Justificación de la investigación.....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1. Objetivo General .....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. Alcance .....	4
1.5. Limitaciones .....	6
1.6. Metodología de la investigación.....	7
1.6.1. Tipo de investigación .....	7
1.6.2. Enfoque .....	7
1.6.3. Técnica .....	7
1.6.4. Modalidad de recopilación de información .....	8
1.7. Resultados esperados .....	9

1.8. Elementos diferenciadores e innovadores de la investigación .....	10
CAPÍTULO 2.....	12
2. INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA LTE .....	12
2.1. Regulación actual de la telefonía móvil en el Ecuador .....	12
2.1.1. Ley Orgánica de Telecomunicaciones .....	13
2.1.2. Reglamento para la prestación del Servicio Móvil Avanzado .....	13
2.2. Reglamento para las radiaciones no ionizantes en Ecuador.....	25
2.3. Evolución de la red de telefonía Celular .....	27
2.3.1. Sistemas móviles Pre-Celulares .....	27
2.3.2. Sistemas móviles celulares.....	29
2.4. Conceptos básicos de una red LTE .....	38
2.5. Arquitectura de una red LTE.....	39
2.5.1. Arquitectura de E-UTRAN.....	41
2.5.2. Arquitectura EPC .....	42
2.5.3. Sistema multimedia IP (IMS).....	50
2.5.4. Equipo de Usuario .....	52
2.6. Interfaz de Radio de una red LTE .....	53
2.6.1. Canales lógicos.....	55
2.6.2. Canales de transporte.....	57
2.6.3. Capa física.....	59
2.7. Tecnologías de nivel físico .....	61
2.7.1. OFDM .....	62
2.7.2. OFDMA.....	63
2.7.3. SC-FDMA .....	67
2.8. MIMO .....	68
2.8.1. Definición de MIMO .....	69
2.8.2. Diversidad en el espacio .....	71
2.8.3. Técnicas de Transmisión de MIMO.....	72
2.8.4. Funcionamiento de MIMO.....	75
2.8.5. MIMO en LTE .....	77

2.9. Agregación de portadora (CA) .....	79
2.10. Limitaciones de LTE .....	79
CAPÍTULO 3.....	81
3. MODELAMIENTO DE UNA RED LTE EN LA HERRAMIENTA ATOLL.....	81
3.1. Elementos de planeación de una red.....	81
3.1.1. Especificación inicial de la red .....	83
3.1.2. Mapas Digitales .....	86
3.1.3. Modelos de propagación.....	88
3.2. Implementación de una red LTE en ATOLL.....	92
3.2.1. Creación de un Proyecto.....	93
3.2.2. Importación de Mapas Digitales .....	93
3.2.3. Creación de una celda celular .....	95
3.2.4. Predicciones de Cobertura.....	99
3.2.5. Simulación de Monte Carlo .....	102
3.3. Optimización de una red LTE en ATOLL .....	105
3.3.1. Configuración del modelo de propagación .....	105
3.3.2. Planificación de cobertura.....	106
3.3.3. Configuración de servicios .....	107
3.3.4. Mapas de tráfico .....	108
3.3.5. Planeación de vecindades .....	109
3.3.6. Planeación de frecuencias .....	110
3.3.7. Planificación de Physical Cell ID .....	110
3.4. Implementación de MIMO en ATOLL.....	111
3.4.1. Configuración de Parámetros.....	112
3.4.2. Simulación de MIMO en LTE .....	113
3.5. Implementación de Agregación de Portadora en ATOLL.....	115
3.5.1. Configuración de Parámetros.....	116
3.5.2. Simulación de Segunda Portadora en ATOLL.....	116
CAPÍTULO 4.....	118
4. ANALISIS Y RESULTADOS .....	118

4.1.	Definición de los escenarios y análisis.....	118
4.1.1.	Especificación de escenarios de estudio.....	119
4.1.2.	Limitaciones del análisis .....	120
4.2.	Estudio de la Diversidad .....	121
4.2.1.	Análisis de cobertura .....	123
4.2.2.	Análisis de throughput.....	123
4.2.3.	Análisis de capacidad .....	126
4.3.	Análisis de la Multiplexación espacial .....	128
4.3.1.	Análisis de cobertura .....	130
4.3.2.	Análisis de throughput.....	130
4.3.3.	Análisis de capacidad .....	132
4.4.	Estudio de Adaptive MIMO Switching .....	135
4.4.1.	Análisis de cobertura .....	138
4.4.2.	Análisis de throughput.....	138
4.4.3.	Análisis de capacidad .....	140
4.5.	Estudio de SU-MIMO.....	142
4.5.1.	Análisis de cobertura .....	144
4.5.2.	Análisis de throughput.....	144
4.5.3.	Análisis de capacidad .....	148
4.6.	Estudio de MU-MIMO .....	149
4.6.1.	Análisis de cobertura .....	151
4.6.2.	Análisis de throughput.....	151
4.6.3.	Análisis de capacidad .....	155
4.7.	Estudio de Agregación de segunda portadora .....	155
4.7.1.	Análisis de cobertura .....	156
4.7.2.	Análisis de throughput.....	158
4.7.3.	Análisis de capacidad .....	159
4.8.	Consideraciones para la implantación .....	161
4.8.1.	Análisis de Indicadores de calidad (Accesibilidad y Throughput) .	162
4.8.2.	Estimación de la demanda por aplicación tecnológica .....	164

4.8.3. Plan de acción para mejorar los indicadores de calidad.....	168
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	174
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	179
ANEXO A: PANTALLAS DE SIMULACIÓN .....	184
A. PANTALLAS DE SIMULACIÓN .....	184

## ABREVIATURAS

<b>3GPP / 3GPP2</b>	Third Generation Partnership Project / Third Generation Partnership Project version 2
<b>ADSL</b>	Asymmetric Digital Subscriber Line
<b>AMC</b>	Adaptive Modulation and Coding
<b>AMPS</b>	Advanced Mobile Phone System
<b>ASPs</b>	Application Service Providers
<b>BCCH</b>	Broadcast Control Channel
<b>BCH</b>	Broadcast Channel
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>CA</b>	Carrier Agregation
<b>CCCH</b>	Common Control Channel
<b>CCE</b>	Control Channel Elements
<b>CCPCH</b>	Common Control Physical Channel
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>DCCH</b>	Dedicated Control Channel
<b>DCI</b>	Downlink Control Information
<b>DL-SCH</b>	Downlink Shared Channel
<b>DoA</b>	Direction of Arrival
<b>DTCH</b>	Dedicated Traffic Channel

<b>ECSD</b>	Enhanced Circuit Switched Data
<b>EDGE</b>	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
<b>EGPRS</b>	Enhanced GPRS
<b>eNB</b>	Evolved NodeB
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core
<b>EPS</b>	Evolved Packet System
<b>E-UTRAN</b>	Evolved UTRAN
<b>E-RAB</b>	E-UTRAN Radio Access Bearer
<b>FCC</b>	Federal Communication Commission
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplexing
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>FTTH</b>	Fiber To The Home
<b>GERAN</b>	GSM/EDGE Radio Access Network
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service
<b>GSM</b>	Global System for Mobile
<b>GSMA</b>	GSM Association
<b>GW</b>	Gateway
<b>HARQ</b>	Hybrid Automatic Request
<b>HSDPA</b>	High-Speed Downlink Packet Access
<b>HSPA</b>	High-Speed Packet Access
<b>HSS</b>	Home Subscriber Server
<b>HSUPA</b>	High-Speed Uplink Packet Access

<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronic Engineers
<b>IMT-2000</b>	International Mobile Telephone 2000
<b>IMTS</b>	Improved Mobile Telephone Service
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>ITU / UIT</b>	International Telecommunications Union
<b>ISI</b>	Intersymbolic Interference
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>MCCH</b>	Multicast Control Channel
<b>MCH</b>	Multicast Channel
<b>MIMO</b>	Multiple Input – Multiple Output
<b>MME</b>	Mobility Management Entity
<b>MTCH</b>	Multicast Traffic Channel
<b>MTS</b>	Mobile Telephone System
<b>NAS</b>	Non Access Stratum
<b>NB</b>	NodeB
<b>NMT</b>	Nordic Mobile Telephony
<b>OCS</b>	Online Charging System
<b>OFCS</b>	Offline Charging System
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>PBCH</b>	Physical Broadcast Channel
<b>PCC</b>	Policy and Charging Control



<b>PCCH</b>	Paging Control Channel
<b>PCH</b>	Paging Channel
<b>PCFICH</b>	Physical Control Format Indicator Channel
<b>PCRF</b>	Policy and Charging Rules Function
<b>PCS</b>	Personal Communication System
<b>PDC</b>	Pacific Digital Communication
<b>PDCCH</b>	Physical Downlink Control Channel
<b>PDCP</b>	Packet Data Convergence Protocol
<b>PDSCH</b>	Physical Downlink Shared Channel
<b>P-GW</b>	Packet Data Network Gateway
<b>PIM</b>	Passive Intermodulation
<b>PMCH</b>	Physical Multicast Channel
<b>PMIPv6</b>	Proxy Mobile IPv6
<b>PTT</b>	Push To Talk
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QoE</b>	Calidad de la Experiencia
<b>QoS</b>	Calidad del Servicio
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying
<b>RACH</b>	Random Access Channel
<b>RLC</b>	Radio Link Control
<b>RNC</b>	Radio Network Controller
<b>RNP</b>	Radio Network Planning

<b>RRC</b>	Radio Resource Control
<b>SAE</b>	System Architecture Evolution
<b>SC-FDMA</b>	Single Carrier – Frequency Division Multiple Access
<b>SFN</b>	Single-Frequency Network
<b>S-GW</b>	Serving Gateway
<b>SIM</b>	Subscriber Identity Module
<b>SIP</b>	Session Initiation Protocol
<b>SMS</b>	Short Message Service
<b>STBC</b>	Space-Time Block Coding
<b>STC</b>	Space-Time Coding
<b>STTC</b>	Space-Time Trellis Coding
<b>TACS</b>	Total Access Communication System
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>UL-SCH</b>	Uplink Shared Channel
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunication Service
<b>UTRA</b>	Universal Terrestrial Radio Access
<b>UTRAN</b>	UMTS Terrestrial Radio Access Network
<b>WAP</b>	Wireless Application Protocol
<b>WCDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cambios en las principales TICs a nivel mundial, 2000-2015 .....	xxiii
Figura 1.2. Suscripciones móviles por tecnología .....	xxiv
Figura 2.1. Parámetros de calidad del servicio .....	14
Figura 2.2. Red de comunicación celular .....	28
Figura 2.3. Dominio frecuencial de las tecnologías de acceso múltiple en enlace descendente y ascendente .....	39
Figura 2.4. Arquitectura del sistema LTE .....	40
Figura 2.5. Arquitectura de E-UTRAN.....	41
Figura 2.6. Arquitectura básica de la red troncal EPC.....	43
Figura 2.7. Tipos de interconexión a través de SGi.....	44
Figura 2.8. Interfaces basadas en GTP-U.....	47
Figura 2.9. Interfaces basadas en GTP-C.....	47
Figura 2.10. Interfaces basadas en Diameter .....	48
Figura 2.11. Interfaces basadas en PMIPv6 .....	49
Figura 2.12. Protocolos NAS entre equipo de usuario y MME.....	50
Figura 2.13. Modelo de provisión de servicios en base al subsistema IMS.....	51
Figura 2.14. Equipo de usuario .....	53
Figura 2.15. Estructura de trama genérica.....	60
Figura 2.16. Espectro OFDM .....	63
Figura 2.17. Programación de paquetes en OFDMA .....	64
Figura 2.18. Asignación de subportadoras a celdas con $F=3$ .....	65
Figura 2.19. Ejemplo de OFDMA con reuso $F=1$ .....	67
Figura 2.20. Esquema de una estructura MIMO.....	71
Figura 3.1. Pasos en la planeación de redes .....	83
Figura 3.2. Relieve del perímetro de la ciudad de Quito.....	88
Figura 3.3. Algoritmo de simulación de tráfico en ATOLL .....	104
Figura 3.4. Creación de un nuevo mapa de tráfico.....	109
Figura 3.5. Predicción de cobertura en red LTE con MIMO 1x1 .....	114

Figura 3.6. Predicción de cobertura en red LTE con MIMO 4x1 .....	115
Figura 3.7. Red LTE Estándar (Portadora Simple).....	116
Figura 3.8. Red LTE con dos portadoras: 700 MHz y 2100 MHz .....	117
Figura 4.1. Porcentaje de cobertura (RSRP > -90dBm) .....	123
Figura 4.2. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado receptor .....	124
Figura 4.3. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado transmisor.....	124
Figura 4.4. Capacidad de la red en bajo tráfico de datos .....	127
Figura 4.5. Capacidad de la red en alto tráfico de datos .....	127
Figura 4.6. Porcentaje de cobertura (RSRP > -90dBm) .....	130
Figura 4.7. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado receptor .....	131
Figura 4.8. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado transmisor.....	131
Figura 4.9. Capacidad de la red con bajo tráfico de datos .....	133
Figura 4.10. Capacidad de la red con alto tráfico de datos .....	133
Figura 4.11. Porcentaje de cobertura (RSRP > -90dBm) .....	138
Figura 4.12. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado receptor .....	139
Figura 4.13. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado transmisor.....	139
Figura 4.14. Capacidad de la red con bajo tráfico de datos .....	141
Figura 4.15. Capacidad de la red con alto tráfico de datos .....	141
Figura 4.16. Porcentaje de cobertura (RSRP > -90dBm) .....	144
Figura 4.17. Throughput promedio con incremento de antenas en lado receptor.....	145
Figura 4.18. Throughput promedio con incremento de antenas en lado transmisor ....	145
Figura 4.19. Capacidad de la red con bajo tráfico de datos .....	147
Figura 4.20. Capacidad de la red con alto tráfico de datos .....	147
Figura 4.21. Porcentaje de cobertura (RSRP > -90dBm) .....	151

Figura 4.22. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado receptor .....	152
Figura 4.23. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado transmisor.....	152
Figura 4.24. Capacidad de la red con bajo tráfico de datos .....	154
Figura 4.25. Capacidad de la red con alto tráfico de datos .....	154
Figura 4.26. Porcentaje de cobertura (RSRP > -90dBm) .....	157
Figura 4.27. Throughput promedio con agregación de una portadora en baja tráfico de datos.....	159
Figura 4.28. Throughput promedio con agregación de una portadora en alto tráfico de datos.....	159
Figura 4.29. Capacidad de las celdas con agregación de una portadora .....	160
Figura 4.30. Líneas activas por tecnología.....	167
Figura A.1. Creación de un proyecto en ATOLL basado en plantillas .....	184
Figura A.2. Creación de un proyecto en ATOLL a partir de una base de datos.....	184
Figura A.3. Importación de datos geográficos en ATOLL.....	185
Figura A.4. Creación de una plantilla de eNB en ATOLL .....	185
Figura A.5. Simulación Monte Carlo del tráfico con ATOLL .....	186
Figura A.6. Configuración del modelo de propagación estándar en ATOLL .....	186
Figura A.7. Establecimiento del modelo de propagación en los transmisores .....	187
Figura A.8. Proceso para creación de predicción de cobertura en ATOLL .....	187
Figura A.9. Configuración del servicio Descarga FTP.....	188
Figura A.10. Configuración del servicio Navegación Web.....	188
Figura A.11. Configuración de vecindades en ATOLL .....	189
Figura A.12. Configuración de frecuencias en ATOLL .....	189
Figura A.13. Configuración de identificación de celda física .....	190
Figura A.14. Procedimiento para la configuración MIMO .....	190
Figura A.15. Configuración de puertos de transmisión y recepción.....	191
Figura A.16. Configuración para añadir un Componente de Portadora.....	191

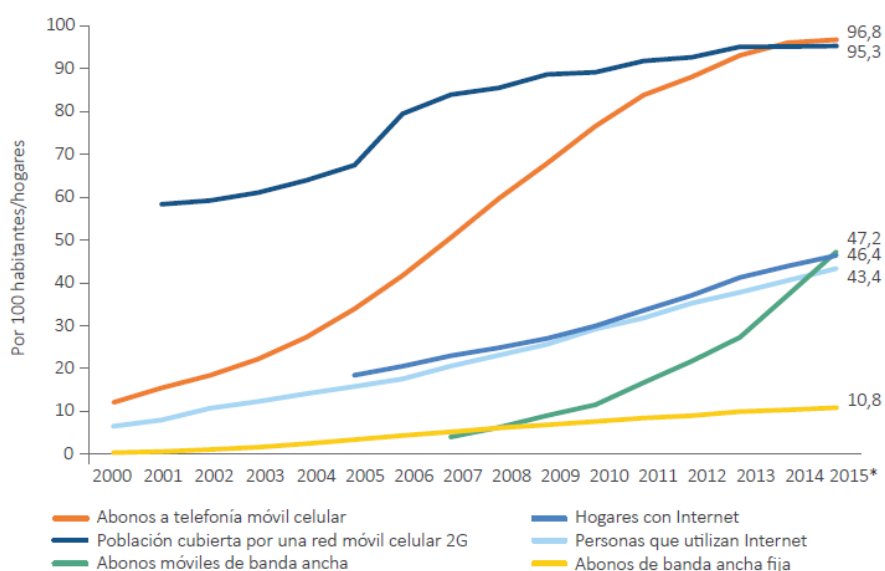
## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Alcance de la investigación .....	6
Tabla 1.2. Resultados esperados .....	10
Tabla 2.1. Parámetros de calidad del SMA en Ecuador .....	24
Tabla 2.2. Comparación resumida entre generaciones de tecnología móvil 1G - 5G ....	37
Tabla 2.3. Protocolos de plano usuario.....	55
Tabla 2.4. Canales lógicos de tráfico .....	56
Tabla 2.5. Canales lógicos de control .....	57
Tabla 2.6. Canales de transporte de enlace descendente .....	58
Tabla 2.7. Canales de transporte de enlace ascendente .....	59
Tabla 2.8. Canales físicos de enlace descendente .....	61
Tabla 3.1. Modelos de propagación comúnmente usados .....	90
Tabla 3.2. Bandas de frecuencia LTE en Ecuador .....	95
Tabla 3.3. Distribución de frecuencias de las bandas de operación.....	96
Tabla 3.4. Parámetros de configuración de transmisores y celdas .....	99
Tabla 3.5. Tipo de predicciones de cobertura en ATOLL .....	102
Tabla 3.6. Configuración de los tipos de servicio .....	107
Tabla 4.1. Simulación de escenario base (portadora 20MHz y baja carga de tráfico) .	122
Tabla 4.2. Simulación de escenario comparativo (portadora 20MHz y alta carga de tráfico) .....	122
Tabla 4.3. Simulación de escenario base (portadora 20MHz y baja carga de tráfico) .	129
Tabla 4.4. Simulación de escenario comparativo (portadora 20MHz y alta carga de tráfico) .....	129
Tabla 4.5. Cobertura de DRFS (portadora 20MHz y alta carga de tráfico) .....	136
Tabla 4.6. Simulación de escenario base (portadora 20MHz y baja carga de tráfico) .	137
Tabla 4.7. Simulación de escenario comparativo (portadora 20MHz y alta carga de tráfico) .....	137
Tabla 4.8. Simulación de escenario base (portadora 20MHz y baja carga de tráfico) .	143

Tabla 4.9. Simulación de escenario comparativo (portadora 20MHz y alta carga de tráfico) .....	143
Tabla 4.10. Simulación de escenario base (portadora 20MHz y baja carga de tráfico).....	150
Tabla 4.11. Simulación de escenario comparativo (portadora 20MHz y alta carga de tráfico) .....	150
Tabla 4.12. Simulación de agregación de portadora - con bajo trafico .....	156
Tabla 4.13. Simulación de agregación de portadora - con alto trafico .....	156
Tabla 4.14. KPIs de accesibilidad .....	163
Tabla 4.15. Número de líneas activas por operador.....	166

## INTRODUCCIÓN

Debido a la demanda de nuevos servicios y aplicaciones, y al uso de dispositivos móviles más modernos y con mayores capacidades para acceder a la red, las operadoras móviles buscan evolucionar constantemente sus servicios de comunicación para satisfacer a sus consumidores y potenciales clientes. Es así que, la proporción de la población mundial cubierta por las redes móviles y celulares es ahora de más del 95% mientras que el número de abonados a servicios de telefonía móvil celular se ha incrementado a 7.300 millones en 2015 [1], ver Figura 1.1

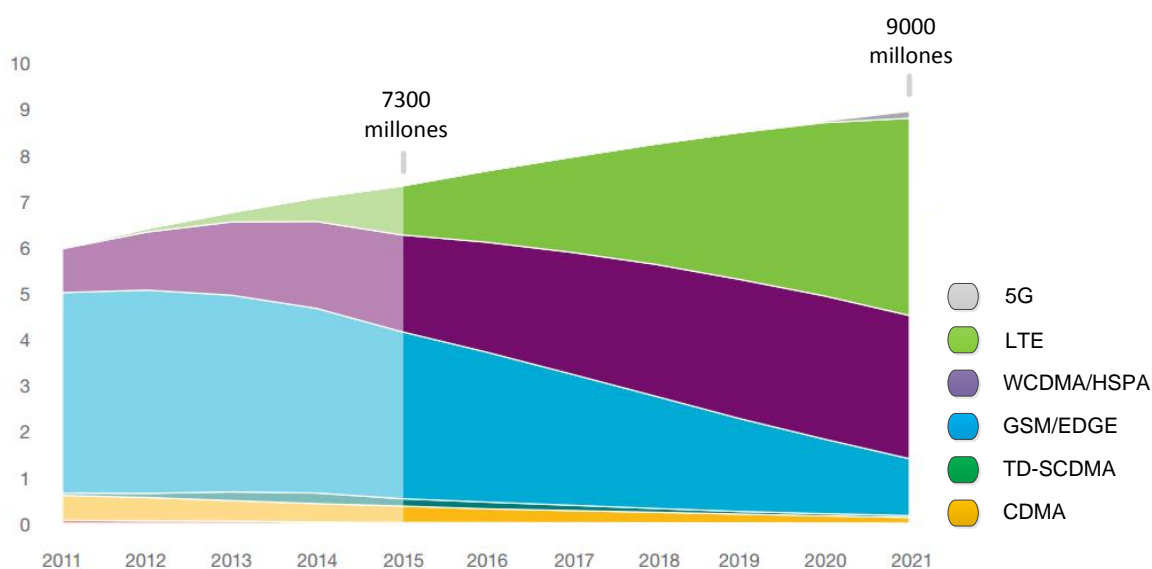


**Figura 1.1. Cambios en las principales TICs a nivel mundial, 2000-2015**

De acuerdo al reporte de movilidad de la compañía de telecomunicaciones Ericsson, el total de suscripciones en el primer trimestre del 2016 fue de alrededor de 7.400 millones, en donde India fue el país que registró un crecimiento mayor de un poco más de 21 millones de suscripciones, seguido por Myanmar e Indonesia con 5 millones cada uno, Estados Unidos y Pakistán con 3 millones cada uno [2].



De acuerdo al mismo reporte, las suscripciones totales de LTE llegan a 1.200 millones en todo el mundo, y en el primer trimestre de 2016, hubo 150 millones de nuevas suscripciones mientras que en WCDMA/HSPA llegó a alrededor de 30 millones.



**Figura 1.2. Suscripciones móviles por tecnología**

De acuerdo a la Figura 1.2, en el 2019 LTE será la tecnología de acceso móvil dominante con aproximadamente 4.000 millones de suscripciones y, para el 2021, tanto LTE como WCDMA/HSPA tendrán más del doble de suscriptores que la de GSM/EDGE.

El tráfico de datos continúa creciendo y, de acuerdo a estos reportes, entre el primer trimestre de 2015 y el primero de 2016 hubo un incremento del 60%, debido, principalmente a que los abonados adquieren nuevos y mejores dispositivos móviles con capacidades mejoradas especialmente en las aplicaciones de video. Se estima que entre el 2015 y el 2021 el tráfico generado desde los teléfonos inteligentes crecerá en 12 veces.

Ambos reportes coinciden en que el despliegue de redes de tercera y cuarta generación, los operadores de telefonía celular en todo el mundo han visto un rápido crecimiento de los suscriptores de internet móvil, generando un crecimiento sostenido del volumen de tráfico generado por el usuario, debido principalmente al aumento del uso de servicios multimedia de voz y audio, compartición de archivos, acceso a redes sociales, video, entre otros. Además coinciden en que este crecimiento de suscriptores será mayor para los próximos años generando grandes cantidades de tráfico en las redes de acceso de las diferentes tecnologías.

Por otro lado, el GSMA (Asociación del Grupo Especial Móvil, por sus siglas en francés) en su reporte de Economía Móvil de 2015, el crecimiento de redes LTE llegó en 2014 a 335 redes implementadas en 118 países. Actualmente alcanza al 26% de la población mundial, aunque haya una marcada diferencia con los mercados desarrollados, alcanzando el 90% de cobertura en estos mercados y 15% en los mercados en desarrollo [3].

De acuerdo a este estudio, para el año 2020 los mercados desarrollados esperan alcanzar una cobertura móvil del 95% del total de la población y se espera que en los mercados en desarrollo las redes LTE alcance al menos el 60% de cobertura.

La cobertura de servicio móvil celular, que ha venido desarrollándose estos últimos años y que tienen un horizonte de crecimiento considerable, al menos hasta el 2020, debe venir acompañado de técnicas que las operadoras de telefonía móvil deben ir desarrollando para poder optimizar su red para prestar velocidades de transmisión de datos LTE más altos. Una de las barreras que impediría este objetivo es el espectro; el cual, gracias a la implementación de nuevas capacidades comercializables de LTE proveerán a partir del 2016 mayor eficiencia espectral y entregarán una tasa máxima de datos de 1Gb/s usando la banda 60Mhz del espectro [2]. Estas capacidades incluyen:

- Agregación de portadora de tres componentes de 20 MHz cada una, permitiendo la agregación total de 60 MHz del espectro de LTE.

- Modulación de Amplitud de Cuadratura 256 (256-QAM, por sus siglas en inglés), lo que incrementa la velocidad de los datos del enlace descendente (downlink) en un 33%.
- Múltiple entrada múltiple salida 4x4 (MIMO, por sus siglas en inglés), lo que duplica el número de tramas de datos únicos transmitidos por los teléfonos inteligentes de los usuarios, y por tanto duplica hasta dos veces la eficiencia del canal (throughput).

Cuando 2 portadoras agregadas LTE de 20 MHz usando MIMO 4x4 y 256-QAM agregado se combinan con una simple portadora LTE de 20 MHz usando MIMO 2x2 y 256-QAM, LTE puede soportar una tasa pico de 1Gb/s en el enlace descendente.

Estas velocidades permiten al usuario mejorar sus experiencias tanto en el interior como en el exterior, pero hay que tomar en cuenta que éstas son teóricas y dependen del tipo de dispositivo utilizado, la ubicación del usuario y las condiciones de la red.

Por las variables mencionadas anteriormente más algunas otras inherentes a las comunicaciones móviles, aunado al hecho que LTE es un sistema que opera completamente en Modo Paquete, es indispensable disponer de un mecanismo que permita compartir de forma organizada los recursos radio entre los usuarios. Con la finalidad de evaluar qué tan buena es una red ya implementada, se realizan simulaciones para conocer los parámetros utilizados que puedan servir para realizar ajustes en la red o para futuras implementaciones.

## **CAPÍTULO 1**

### **1. MARCO REFERENCIAL**

El presente capítulo describe el problema de investigación sobre el desempeño de una red LTE basado en técnicas de múltiples antenas, su justificación y los objetivos planteados, así como el alcance del trabajo, sus limitaciones, la metodología utilizada y los resultados esperados.

#### **1.1. Descripción de la investigación**

Este trabajo de investigación estudia el impacto en el desempeño de una red LTE, con la implementación de técnicas de diversidad, multiplexación espacial, AMS, SU-MIMO y MU-MIMO, y de agregación de segunda portadora, modelando escenarios de alta densidad de tráfico en un ambiente denso urbano utilizando la herramienta de planificación radio ATOLL.

Los servicios que se ofrecen a través de las comunicaciones móviles está evolucionando [1]. Una de las consideraciones que se toman en cuenta al momento de planificar, gestionar y monitorear la red es la congestión por el incremento del tráfico de usuarios. Según (CISCO, 2013) las tendencias que están impulsando el crecimiento del tráfico de datos móviles son el aumento de los usuarios y de conexiones móviles, así como mayores velocidades de acceso y el incremento en el uso de aplicaciones de video en los dispositivos móviles.

Además de la congestión, también pueden presentarse otras situaciones como pérdidas de información por desconexión, bloqueos de acceso o tasa de servicio bajos, haciendo que los indicadores de desempeño, medidos por los gestores de la red, sean bajas y preocupantes para las operadoras telefónicas y los entes de regulación y control.

El problema que se presenta para las operadoras y que se identifica en esta propuesta, es la posible degradación de la calidad de servicio ofrecido debido al incremento de conexiones móviles, usuarios de telefonía celular o incluso el aumento de nuevos usos que los usuarios les dan, tal es el caso del video móvil, por lo que es necesario que las operadoras definan las acciones pertinentes que les permita sobrellevar los crecimientos constantes del tráfico de usuarios en la red.

## **1.2. Justificación de la investigación**

Con el despliegue de LTE en Ecuador, los usuarios móviles esperan tener un nivel de servicio mejorado y demandarán más velocidades, cobertura y capacidad, por lo que el reto de las operadoras está en cumplir con expectativas más exigentes en cuanto a estos factores, así como también en el volumen de tráfico de datos intercambiado entre redes móviles. En términos generales, el usuario móvil espera poder disfrutar de un nivel de calidad del servicio similar al de la banda ancha fija [4].

De la misma manera, el país está enfrentando cambios en sus políticas gubernamentales para el uso eficiente de su espectro electromagnético; siendo así que la política 11.3 del Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017 [5] indica que el estado democratizará la prestación de servicios públicos, incluyendo los de telecomunicaciones y el espectro radioeléctrico; mientras que, el macro-objetivo 1 del Plan Nacional de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información 2016-2021 incluye políticas, programas y proyectos para completar y fomentar el despliegue de infraestructura de telecomunicaciones incluyendo las 2G, 3G y 4G hasta el 2021 [6].

En el transcurrir de la evolución de la telefonía celular, las antenas de las estaciones base han ido evolucionando para poder optimizar la transmisión y recepción de señales. La adopción de nuevas técnicas, como por ejemplo MIMO (Múltiples Entradas – Múltiples Salidas, por sus siglas en inglés) puede aportar en el aumento de la velocidad de datos y en la eficiencia espectral [7]. Los sistemas modernos de comunicación utilizan MIMO para alcanzar altas tasas de transmisión y, aplicada de manera adecuada en sistemas de transmisión celular, también permite mejorar la transmisión a los usuarios incluso en los sectores más lejanos de la celda que ilumina el radio de cobertura.

También se destaca la funcionalidad de Agregación de Portadoras de LTE ya que permite a los operadores multiplicar el ancho de banda proporcionado a los usuarios utilizando los recursos radio sobre diferentes portadoras. Esta agregación de mayores porciones del espectro aumenta el ancho de banda y permite a los operadores crear canales de mayor capacidad para soportar servicios con un mejor QoE (Calidad de la Experiencia, por sus siglas en inglés).

En estas redes hay una gran cantidad de parámetros de radio que deben tomarse en cuenta al momento de planificar su implementación o de mejorar su desempeño por lo que se hace indispensable estudiar su comportamiento en función de las variables previamente identificadas.

Los riesgos tanto tecnológicos como financieros, deben ser llevados de forma cuidadosa por parte del operador, por lo que debe primar la correcta planificación desde la etapa inicial de la nueva red, y considerar la factibilidad de la adaptación de nuevas tecnologías desde el punto de vista técnico, tratando de simular de la manera más real el comportamiento de la red, con varios escenarios para minimizar de manera oportuna los riesgos que incurren en el proyecto.

### **1.3. Objetivos**

En los siguientes apartados se detallan el objetivo general y los específicos del presente proyecto de titulación.

### **1.3.1. Objetivo General**

Analizar el desempeño en términos de calidad de señal, cobertura y eficiencia de canal en una red LTE, en un escenario de alta carga de tráfico de datos.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Identificar las características técnicas de los sistemas MIMO y de la funcionalidad de agregación de portadora en un sistema de transmisión móvil LTE.
- Analizar los efectos que pudieran ocasionar la adaptación de técnicas de múltiples antenas MIMO y la agregación de segunda portadora en una red móvil LTE utilizando la herramienta ATOLL, en un escenario de alto tráfico en términos de:
  - Calidad de señal
  - Eficiencia de canal (throughput)
  - Cobertura
- Identificar las consideraciones a tener en cuenta en la planificación de redes móviles LTE y que permitan mitigar los efectos de congestión y calidad de servicio producidos por el incremento del tráfico de usuarios.

### **1.4. Alcance**

El alcance de este trabajo es el de estudiar la tecnología LTE, las técnicas de mejoramiento en la velocidad de datos y en eficiencia espectral, y analizar el comportamiento de redes LTE en función de: parámetros de cobertura, eficiencia de canal y calidad de señal mediante la simulación de escenarios de alta densidad de tráfico de datos.

En la siguiente tabla se identifican los entregables del presente trabajo para cada objetivo específico planteado.

<b>Objetivo específico</b>	<b>Alcance / Entregables</b>
<p>Identificar las características técnicas de los sistemas MIMO y de la funcionalidad de agregación de portadora en un sistema de transmisión móvil LTE.</p>	<p><b><u>Capítulo 2</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Descripción de la interfaz radio y los componente de la red LTE.</li> <li>- Descripción del funcionamiento de MIMO en LTE.</li> <li>- Comportamiento de la red LTE al aplicar agregación de portadora.</li> </ul>
<p>Analizar los efectos que pudieran ocasionar la adaptación de técnicas de múltiples antenas MIMO y la agregación de segunda portadora en una red móvil LTE utilizando la herramienta ATOLL, en un escenario de alto tráfico en términos de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calidad de señal</li> <li>• Eficiencia de canal</li> <li>• Cobertura</li> </ul>	<p><b><u>Capítulo 3</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estudio de la optimización de una red LTE en ATOLL.</li> <li>- Estudio de la implementación de MIMO en ATOLL.</li> <li>- Estudio de la implementación de Agregación de Portadora en ATOLL.</li> </ul> <p><b><u>Capítulo 4</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Resultados del estudio de diversidad: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de capacidad</li> <li>• Análisis de eficiencia de canal</li> <li>• Análisis de cobertura</li> </ul> </li> <li>- Resultados de la multiplexación espacial: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de capacidad</li> <li>• Análisis de eficiencia de canal</li> <li>• Análisis de cobertura</li> </ul> </li> </ul>



Objetivo específico	Alcance / Entregables
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resultados de MIMO Switching, MU-MIMO, SU-MIMO:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de capacidad</li> <li>• Análisis de eficiencia de canal</li> <li>• Análisis de cobertura</li> </ul> </li> <li>- Resultados de Agregación de segunda portadora:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de capacidad</li> <li>• Análisis de eficiencia de canal</li> <li>• Análisis de cobertura</li> </ul> </li> </ul>
<p>Identificar las consideraciones a tener en cuenta en la planificación de redes móviles LTE y que permitan mitigar los efectos de congestión y calidad de servicio producidos por el incremento del tráfico de usuarios</p>	<p><b><u>Capítulo 4</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Consideraciones para la implementación de LTE.</li> <li>- Plan de acción para mejorar los indicadores de Calidad.</li> </ul>

**Tabla 1.1. Alcance de la investigación**

### 1.5. Limitaciones

Las limitaciones que se presentan en este trabajo son:

- Se utiliza como herramienta de trabajo y simulación el software ATOLL, versión 3.3.0.
- Los estudios y pruebas mostradas en este documento se limitaron a las opciones que dispone ATOLL para modelar redes LTE. Los algoritmos

empleados por esta herramienta simulan tiempos de ejecución instantánea, ya que no tiene capacidad de memoria de eventos pasados por lo que los resultados podrían tener comportamientos algo diferentes a los presentados en este estudio.

## **1.6. Metodología de la investigación**

Con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados en la Sección 1.3, se desarrolla una metodología investigativa basada en información técnica relacionada a la tecnología LTE, MIMO y de Agregación de Portadora.

### **1.6.1. Tipo de investigación**

La presente investigación es del tipo exploratoria, y está dividido prácticamente en dos etapas: la primera es cualitativa, que identifica las características y variables más importantes a analizar dentro del análisis del desempeño de la red LTE utilizando las técnicas de transmisión MIMO y de agregación de portadora; y, la segunda es cuantitativa, porque permite determinar los valores que se deben configurar para el buen funcionamiento de la red.

### **1.6.2. Enfoque**

El enfoque de este trabajo es del tipo mixto, ya que se busca combinar las prácticas de los métodos cualitativos y cuantitativos para explorar las características de la red LTE en ambientes de alto tráfico de datos.

### **1.6.3. Técnica**

En la etapa inicial se revisará el estado del arte de la tecnología LTE, la evolución de los sistemas de telefonía móvil, para posteriormente enfocarse en el estudio teórico acerca del funcionamiento y características de este sistema de telefonía. Con estos antecedentes, se revisarán los conceptos básicos de MIMO, además de la función de agregación de segunda portadora

y se identificarán las técnicas de múltiples antenas que aplican al desempeño del acceso de radio basado en OFDM para los enlaces ascendentes y descendentes en LTE.

En nuestra implementación usaremos la herramienta de planificación y optimización ATOLL, que permite simular un entorno cercano a la realidad del desempeño de una red de telefonía celular.

En la última etapa, se analizará el comportamiento de la red LTE utilizando ATOLL, en la cual se configurarán los diferentes parámetros necesarios dependiendo de los escenarios a analizar, y se determinarán los resultados en términos de accesibilidad y de eficiencia de canal. Posteriormente se identificarán las consideraciones a seguir en la planificación de una red móvil LTE para el tráfico de datos.

Se escogerá la locación en el centro de la ciudad de Quito para el análisis, por tratarse de un área urbana con alto tráfico de usuarios de las diferentes operadoras del país. De acuerdo a datos estadísticos Quito es la segunda ciudad con mayor densidad poblacional del país, después de Cuenca, con 4.347,98 habitantes por kilómetro cuadrado [8].

#### **1.6.4. Modalidad de recopilación de información**

Luego de haber realizado de forma completa la planificación de la red y se encuentren completos los parámetros, se procederá a simular los diferentes escenarios implementando las técnicas de múltiples antenas MIMO y se variarán los parámetros que se encuentran inmersos en el proceso para luego medir y evaluar los resultados. Adicionalmente, se considerará la agregación de una portadora para evaluar la optimización del ancho de banda utilizado.

Para cumplir con los objetivos planteados, se recurrirá a conceptos de planificación de redes móviles, uso de librerías, fórmulas, componentes y

procesos de manejo de esta herramienta, para predecir el comportamiento de una red LTE en función de parámetros que tienen comportamientos diferentes dependiendo del escenario de prueba.

La información de análisis será presentada por gráficas propias de la herramienta ATOLL, que es una herramienta de planificación y optimización, desarrollada por la empresa Forsk y permite estudiar el comportamiento de las redes para optimizarlas de la mejor manera [9]. Adicionalmente se utilizará Microsoft Excel para presentar de forma gráfica el desempeño de la red en función de las variables objeto de análisis: calidad, cobertura y eficiencia de canal (throughput).

### 1.7. Resultados esperados

Al final de este estudio se espera obtener parámetros de configuración para planificar y/u optimizar redes LTE en escenarios de alta densidad de tráfico de datos. Esta información permitirá a los operadores de telefonía móvil, usuarios y entidades de control conocer sobre el desempeño de la red, y tomar las respectivas acciones de mejora en la prestación del servicio. En la siguiente Tabla 1.2 se resumen los resultados esperados:

Resultado esperado	Entregable	Grupos de interés
Identificación de las características técnicas de los sistemas MIMO y de la funcionalidad de agregación de portadora en los sistemas de transmisión móvil LTE.	Capítulo 2 del documento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comunidad universitaria de la ESPOL.</li> <li>- Operadores de telefonía móvil.</li> <li>- Instituciones dedicadas a la investigación y desarrollo de las telecomunicaciones.</li> </ul>
Diagnóstico de los efectos en la red al adaptar técnicas de	Capítulo 3 y 4 del	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comunidad universitaria de la ESPOL</li> </ul>

<b>Resultado esperado</b>	<b>Entregable</b>	<b>Grupos de interés</b>
múltiples antenas MIMO y de agregación de segunda portadora.	documento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operadores de telefonía móvil</li> <li>- Instituciones dedicadas a la investigación y desarrollo de las telecomunicaciones.</li> </ul>
Análisis e interpretación de los indicadores de desempeño (KPIs) identificados que permiten evaluar la red LTE en escenarios de alto tráfico.	Capítulo 4 del documento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comunidad universitaria de la ESPOL</li> <li>- Operadores de telefonía móvil</li> <li>- Instituciones dedicadas a la investigación y desarrollo de las telecomunicaciones.</li> </ul>
Consideraciones para la planificación de redes móviles LTE	Capítulo 4 del documento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Organismos de control y regulación de servicios de telecomunicaciones</li> <li>- Operadores de telefonía móvil.</li> </ul>

**Tabla 1.2. Resultados esperados**

### **1.8. Elementos diferenciadores e innovadores de la investigación**

La planificación de redes de comunicaciones inalámbricas es un tema que se viene investigando de manera creciente en el ámbito académico, en donde existen diversos trabajos que presentan la planificación o diseños de sistemas de telefonía móvil por medio de herramientas gratuitas o poco especializadas en el ámbito profesional que no permiten obtener resultados fiables debido a sus limitaciones tecnológicas en la planificación de frecuencias, modelo de propagación, programador de paquetes, tipos de movilidad, entre otros.

El ambiente que se genera con respecto a los servicios que ofrece una red LTE, ha resultado en una gran expectativa en el usuario y más aún en el operador de

telefonía móvil, debido a la inversión que representa el desarrollo de una nueva red, y de la que se plantea sacar la mayores réditos. Mediante estas premisas, es de relevancia y gran importancia realizar un estudio en torno a una ciudad con zonas densas urbanas, ya que un diagnóstico del desempeño de una red de telecomunicaciones va en beneficio de los usuarios independientemente del operador que éste escoja.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA LTE**

En el presente capítulo se repasan los aspectos regulatorios de la telefonía celular, la evolución de esta red, desde los sistemas pre-celulares hasta llegar a las cuatro generaciones de la telefonía móvil. Una vez identificadas las características de las cuatro generaciones se procede a detallar: los conceptos básicos de redes LTE, su arquitectura, la interfaz radio, las tecnologías a nivel físico, para definir MIMO y agregación de portadora, y sus aplicaciones y limitaciones en tecnología móvil LTE.

#### **2.1. Regulación actual de la telefonía móvil en el Ecuador**

Los parámetros regulatorios vigentes para la telefonía móvil en Ecuador son:

- Constitución de la República del Ecuador
- Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT), Tercer Suplemento. Registro Oficial No. 439 del 18 de Febrero de 2015.
- Reglamento General a la Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT). Decreto Ejecutivo No. 864, Registro Oficial Suplemento No. 676 del 25 de Enero de 2016.
- Reglamento para la prestación del Servicio Móvil Avanzado (SMA). Resolución No. 498-25-CONATEL-2002 del 19 de Septiembre de 2002.

- Plan Nacional de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información del Ecuador 2016-2021. Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL).
- Plan Nacional de Frecuencias Ecuador 2012. ARCOTEL

### **2.1.1. Ley Orgánica de Telecomunicaciones**

La Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT) que fue aprobada por el pleno de la Asamblea Constituyente de Montecristi el 10 de febrero de 2015, entró en vigencia a partir del 18 de febrero de ese año y reemplaza a la ley vigente desde el año 1992, garantizando los derechos de los usuarios, promoviendo los servicios de calidad, permitiendo el acceso a las tecnologías de la información y comunicación, e impulsando el desarrollo social, económico y productivo del país a través de la evolución de las redes de alta velocidad

Adicionalmente, desde el 18 de febrero de 2015, se fusionan la SUPERTEL, SENATEL y CONATEL, conformando la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL).

Mediante Decreto Ejecutivo No. 864, del 28 de diciembre de 2015, se expidió el "Reglamento General a la Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT)", que reglamenta las normas en la aplicación de la LOT, y ratifica las funciones de los organismos encargados de fijar las políticas públicas y reglamentaciones de este sector [10].

### **2.1.2. Reglamento para la prestación del Servicio Móvil Avanzado**

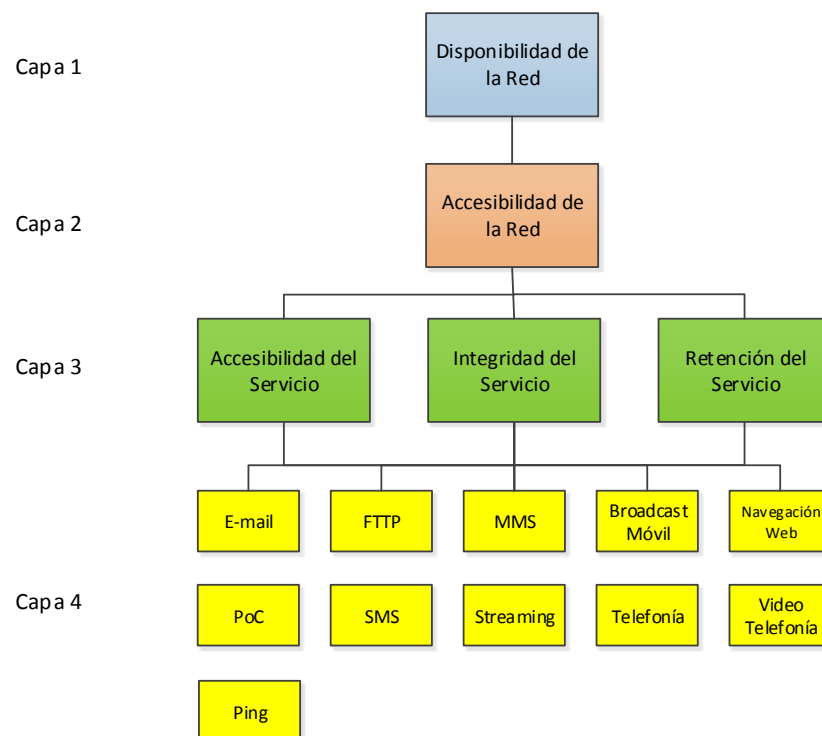
En Ecuador no existe una norma técnica que especifique los parámetros de calidad para regular redes de datos en el SMA. Sin embargo, a nivel internacional existen normativas que aplican para las redes LTE para medir el desempeño su desempeño.



### **Parámetros básicos de calidad del servicio según 3GPP**

En la Figura 2.1 se muestra el modelo de los parámetros de calidad del servicio que aplica para las redes de telecomunicaciones en general, la misma que presenta cuatro capas [11].

La primera capa tiene que ver con la disponibilidad de la red, la cual define la calidad del servicio desde el punto de vista del proveedor del servicio. La segunda capa tiene que ver con el acceso de la red, la cual está relacionada con el punto de vista del usuario y es el requerimiento básico para todos los parámetros de calidad. La tercera capa contiene otros tres aspectos de calidad de servicio que son: Acceso al servicio, Integridad del servicio y la retención del servicio. Los diferentes servicios se localizan en la cuarta capa y su resultado serán los parámetros de calidad.



**Figura 2.1. Parámetros de calidad del servicio**

- **Disponibilidad de la red:** Probabilidad de que los servicios sean ofertados a un usuario a través de la infraestructura de red.
- **Accesibilidad de la red:** Probabilidad de que el usuario realice un registro exitoso en la red que entrega el servicio. Solo se puede acceder a la red si ésta está disponible para el usuario.
- **Accesibilidad del Servicio:** Probabilidad de que el usuario pueda acceder al servicio que desea. La accesibilidad de la red dada es una condicionante para esta fase.
- **Integridad del Servicio:** Describe la calidad del servicio durante el uso del mismo y contiene elementos como la calidad del contenido transmitido como calidad de la conversación, calidad del video o el número de error de bits en un archivo transmitido. La integridad del servicio se puede determinar solo si se ha accedido al servicio de manera exitosa.
- **Retención del Servicio:** Describe la terminación de los servicios (de acuerdo con la intención del usuario). Dentro de este aspecto se encuentran todos los parámetros de caída, como la caída de llamadas, la tasa de caída de llamadas o la tasa de caída de los datos.

### **Parámetros de calidad del servicio en Ecuador**

Los indicadores de calidad vigentes no consideran la medición de indicadores de calidad para redes de datos, ya que al inicio de la suscripción de los contratos de concesión se consideraban en mayor medida los servicios de voz y SMS, estando en etapa de implementación los servicios de datos. En la Tabla 2.1 se resumen los parámetros de calidad que deben cumplir los operadores, según Resolución-TEL-042-01-CONATEL-2014 del 10 de enero de 2014 [12].

Código	Parámetro	Definición	Cálculo para obtener el índice	Valor objetivo	Frecuencia de medición
5.1 (1.1)	Relación con el cliente	<p>Grado de satisfacción que experimenta un abonado/cliente con respecto a los siguientes aspectos de calidad del Servicio Móvil Avanzado:</p> <p>a) Percepción general de la calidad de los servicios concesionados.</p> <p>b) Trato al usuario (amabilidad, disponibilidad, rapidez)</p> <p>c) Percepción general del cliente respecto de la calidad con que se presenta la información de las facturas para postpago y claridad cómo se debita el valor de una recarga (tarjeta, voucher, recarga electrónica) para abonados/clientes prepago</p>	$GSe = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} C_i}{N_c}, \text{ donde:}$ <p><i>GSe</i>: Grado de satisfacción del abonado/cliente encuestado</p> <p><i>C<sub>i</sub></i>: Valor de calificación del encuestado <i>i</i>-és mo. (entre 1 5, donde 1 es malo y 5, excelente)</p> <p><i>N<sub>c</sub></i>: Número de encuestado</p>	$GSe \geq 3,5$	Trimestral
5.2 (1.2)	Porcentaje de reclamos generales	<p>Porcentaje de reclamos generales realizados por los abonados/clientes con respecto al total del líneas activas en servicio al final del mes, pudiendo ser entre otros, los siguientes:</p> <p>a) Activación del servicio distinta a la comprometida, esto es en plazos diferentes a los términos del servicio.</p> <p>b) Indisponibilidad del servicio no provocado por una interrupción.</p> <p>c) Reactivación del servicio en</p>	$\%Rg = \frac{Rg}{Ls} \times 100, \text{ donde:}$ <p><i>%Rg</i>: Porcentaje de reclamos generales del SMA en el mes.</p> <p><i>Rg</i>: Total de reclamos generales presentados en el mes.</p> <p><i>Ls</i>: Total de líneas activas en el mes.</p>	$\%Rg \leq 1\%$	Mensual

Código	Parámetro	Definición	Cálculo para obtener el índice	Valor objetivo	Frecuencia de medición
		<p>plazos distintos a lo comprometido.</p> <p>d) Desconexión o suspensión errónea del servicio.</p> <p>e) No tramitación de solicitud de terminación del servicio.</p> <p>f) Incumplimiento de las cláusulas contractuales pactadas y suspensión del servicio sin fundamento legal.</p> <p>g) No realizar cambio de número cuando éste haya sido solicitado, y</p> <p>h) Otros que sean pertinentes contemplados en el Reglamento para abonados / clientes-usuarios de los servicios de telecomunicaciones y de valor agregado.</p> <p>Se excluyen los reclamos por facturación, débito en prepago y las solicitudes de información.</p>			
5.3 (1.3)	Tiempo promedio de resolución de reclamos	Tiempo promedio medido en horas, que los usuarios esperan para que su reclamo sea reportado en cualquier punto de contacto del proveedor del SMA de voz y datos sea resuelto o atendido.	$Tr = \frac{\sum_{i=1}^{R_r} T e_i}{R_r}, \text{ donde:}$ <p><i>Tr:</i> Tiempo promedio de resolución de reclamos, en horas durante el mes.</p>	$Tr \leq 120 \text{ hrs}$	Mensual

Código	Parámetro	Definición	Cálculo para obtener el índice	Valor objetivo	Frecuencia de medición
			<p><math>T_{e_i}</math>: Tiempo de espera del usuario, para la resolución del reclamo <math>i</math>-ésimo en horas.</p> <p><math>R_r</math>: Total de reclamos reportados en el mes.</p>		
5.4 (1.4)	Tiempo promedio de espera por respuesta de operador humano	Tiempo que transcurre en las llamadas atendidas por operador humano, desde el envío de los dígitos marcados hasta que la voz de un operador humano contesta la llamada cuando se trata de acceso directo. Para el caso de acceso a un operador humano mediante transferencia desde un sistema interactivo, se considera el tiempo que transcurre desde que la llamada es transferida hacia el operador humano hasta que el mismo contesta la llamada.	$T_a = \frac{\sum_{i=1}^{ill} T_{e_i}}{ill},$ $\%C = \frac{llcop}{ill} \times 100, \text{ donde:}$ <p><math>\%C</math>: Porcentaje de cumplimiento</p> <p><math>llcop</math>: Número de llamadas contestadas por un operador humano en un tiempo menor o igual a 20 segundos en el semestre.</p> <p><math>T_a</math>: Tiempo promedio de espera por respuesta de un operador humano en segundos.</p> <p><math>T_{e_i}</math>: Tiempo de espera del usuario, para ser atendido por el operador humano a</p>	<p><math>T_a \leq 20 \text{ s}</math></p> <p><math>\%C \geq 85\%</math></p>	Semestral

Código	Parámetro	Definición	Cálculo para obtener el índice	Valor objetivo	Frecuencia de medición
			<p><i>cada llamada i-ésima en segundos.</i></p> <p><i>ill: Total de llamadas marcadas hacia los centros de servicio de atención al usuario, atendido por un operador humano, en el semestre.</i></p>		
5.5 (1.5)	Porcentaje de reclamos de facturación y débito	<p>Porcentaje de reclamos realizados por los usuarios relacionados con la facturación cíclica de consumo para pospago, débito para prepago, respecto al total de líneas activas en el sistema del servicio en un mes. Se entiende por reclamo de facturación y débito, aquel que tiene lugar cuando el usuario manifiesta inconformidad por uno o varios cargos reflejados en la factura o en el débito, los cuales pudieran deberse, entre otras razones, a las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Cobro de servicios no solicitados.</li> <li>b) Aplicación errónea de los valores pactados para la prestación del servicio.</li> <li>c) Cobro de servicios que hayan sido previa y oportunamente terminados por el usuario.</li> <li>d) Errores de impresión en las</li> </ul>	<p><math>\%Rf = \frac{Fr}{Fe} \times 100</math>, donde:</p> <p><i>%Rf: Porcentaje de reclamos de facturación del SMA en pospago y débito en prepago.</i></p> <p><i>Fr: Total de reclamos de facturación del SMA en pospago y débito en prepago, en el mes objeto del reporte, incluyendo los reclamos de los servicios de voz, internet y demás servicios contemplados en el SMA.</i></p> <p><i>Fe: Líneas activas del sistema SMA en el mes objeto del reporte.</i></p>	%Rf ≤ 0,5%	Mensual

Código	Parámetro	Definición	Cálculo para obtener el índice	Valor objetivo	Frecuencia de medición
		<p>facturas.</p> <p>e) Cobro por uno o varios servicios que estuvieren en proceso de reclamo.</p> <p>f) Cobro de facturas o llamadas que ya fueron pagadas.</p> <p>g) Tarjetas de prepago o similares que no puedan ser utilizadas.</p> <p>h) Acreditación de valores distintos del acordado.</p> <p>i) Cobro por servicios contratados y no proporcionados, y</p> <p>j) Otros que sean pertinentes contemplados en el Reglamento para abonados / clientes-usuarios de los Servicios de Telecomunicaciones y de Valor Agregado.</p>			
5.6 (1.6)	Porcentaje de llamadas establecidas	<p>Porcentaje de las llamadas establecidas exitosamente respecto al número de intentos de llamadas, en la cuarta mayor hora cargada del mes para este servicio. Se consideran llamadas establecidas exitosamente aquellas que se encuentran en los siguientes casos:</p> <p>a) El terminal llamado contesta.</p> <p>b) El terminal llamado está ocupado. En este caso el destino adecuado es el tono de ocupado o la casilla</p>	$\%llcom = \frac{llcom}{ill} \times 100, \text{ donde:}$ <p><i>%llco</i> Porcentaje de llamadas establecidas en la red del prestador del servicio en la cuarta mayor hora cargada del mes, por zona de medición.</p> <p><i>llcom</i>: Número total de llamadas establecidas exitosamente en la red</p>	$\%llcom \geq 96\%$	Mensual

Código	Parámetro	Definición	Cálculo para obtener el índice	Valor objetivo	Frecuencia de medición
		<p>de voz del abonado/cliente-usuario.</p> <p>c) El terminal llamado está apagado o se encuentra fuera del área de servicio. En este caso el destino adecuado es el anuncio grabado correspondiente o casilla de voz.</p> <p>d) El terminal llamado recibe la llamada pero no contesta y se encamina a la casilla de voz.</p> <p>e) El terminal llamado se encuentra con el servicio restringido por falta de pago o a petición del abonado / cliente-usuario. En este caso el destino adecuado es el anuncio grabado correspondiente o casilla de voz.</p> <p>f) El usuario ha marcado un número que no existe. El destino es el anuncio grabado correspondiente.</p> <p>g) El terminal llamado timbra, no contesta la llamada y desconecta.</p>	<p><i>del prestador del servicio, en la cuarta mayor hora cargada del mes, por zona de medición.</i></p> <p><i>ill: Número total de intentos de llamada en la red del prestador del servicio, en la cuarta mayor hora cargada del mes, por zona de medición.</i></p>		
5.7 (1.7)	Tiempo de establecimiento de llamada	Es el tiempo medido en segundos que transcurre entre el instante en que el usuario acciona el pulsador de envío de llamada, luego de marcar el número seleccionado y, la recepción del tono de control de llamada, en la cuarta mayor hora cargada del mes	<p>El indicador debe ser cumplido para el 100% de llamadas establecidas por zona de medición, donde:</p> <p><i>tell: Tiempo de establecimiento de llamada.</i></p>	<i>tell &lt;12 s, para RBS, NBs y eNBs sin enlaces satélites, para el 96% de las</i>	Mensual



Código	Parámetro	Definición	Cálculo para obtener el índice	Valor objetivo	Frecuencia de medición
		(carga normal) para este servicio.		muestras.  tell <14 s, para RBS, NBs y eNBs con enlaces satélites, para el 96% de las muestras.	
5.8 (1.8)	Porcentaje de llamadas caídas	Porcentaje de llamadas caídas, con respecto al número total de llamadas establecidas, medidos por zona de medición por cada tecnología (2G y 3G), en la cuarta mayor hora cargada del mes (carga normal). Una llamada será considerada como caída cuando luego de establecida no puede mantenerse por causas atribuibles a la red en evaluación.	$\%llc = \frac{llc}{lle} \times 100, \text{ donde:}$ <p><i>%llc: Porcentaje de llamadas caídas por zona de medición en la cuarta mayor hora cargada del mes, por zona de medición.</i></p> <p><i>llc: Total de llamadas caídas al mes por zona de medición.</i></p> <p><i>lle: Total de llamadas establecidas al mes por zona de medición.</i></p>	<i>%llc ≤ 2% (2G y 3G)</i>	Mensual
5.9 (1.9)	Nivel mínimo de señal en cobertura (zona de cobertura)	Nivel mínimo de señal que permite la prestación del servicio en la zona de medición y/o carretera, dentro de la cobertura ofertada por el prestador del servicio e informada al abonado /	$\%C = \frac{n_s}{n} \times 100, \text{ donde:}$ <p><i>%C: Porcentaje de cobertura por tecnología y por</i></p>	<i>%C ≥ 95%</i>	

Código	Parámetro	Definición	Cálculo para obtener el índice	Valor objetivo	Frecuencia de medición
		cliente-usuario sobre la disponibilidad del mismo, de conformidad con los valores objetivos establecidos.	<p>servicio.</p> <p><math>n_s</math>: Número de muestras con nivel de señal en el canal de control del equipo terminal superiores o iguales del nivel mínimo, de acuerdo a la tecnología y al servicio.</p> <p><math>n</math>: Número de muestras válidas por tecnología y por servicio.</p>		
5.10 (1.10)	Calidad de conversación	Medida de la calidad extremo a extremo de la conversación de una llamada de servicio de voz dentro de la red del prestador del servicio, la evaluación se realiza por zona de medición y por tecnología.	$MOS = \frac{\sum_{i=1}^n Ca}{n}, \text{ donde:}$ <p><math>MOS</math> Calidad de conversación.</p> <p>:</p> <p><math>Ca</math>: Calificación del equipamiento de acuerdo con la Recomendación ITU-T P.862.</p> <p><math>n</math>: Número total de llamadas de prueba.</p>	$MOS \geq 3,3$ (2G y 3G)	Semestral
5.11 (1.11)	Porcentaje de mensajes cortos con éxito	Porcentaje del número de mensajes cortos recibidos exitosamente por el usuario de destino, con respecto al número total de mensajes cortos enviados por el usuario origen, dentro	$\%Mr = \frac{Mr}{Me} \times 100, \text{ donde:}$ <p><math>\%Mr</math>: Porcentaje de mensajes cortos recibidos en la</p>	$\%Mr \geq 98\%$	Mensual

Código	Parámetro	Definición	Cálculo para obtener el índice	Valor objetivo	Frecuencia de medición
		de la misma red del operador en un mes, en la cuarta mayor hora cargada del mes (carga normal) para este servicio.	<p><i>cuarta mayor hora cargada del mes.</i></p> <p><i>Mr: Número de mensajes cortos recibidos exitosamente.</i></p> <p><i>Me: Número total de mensajes cortos enviados.</i></p>		
5.12 (1.12)	Tiempo promedio de entrega de mensajes cortos	Tiempo promedio medido en segundos, transcurrido entre el envío de un mensaje corto por parte del usuario de origen y la recepción del mensaje por parte del usuario destino, en la misma red del operador, en la cuarta mayor hora cargada del mes (carga normal) para este servicio.	<p><math>Tm = \frac{\sum_{i=1}^{Me} Tt_i}{Me}</math>, donde:</p> <p><i>Tm: Tiempo promedio de envío de mensajes cortos, en segundos en la cuarta mayor hora cargada del mes.</i></p> <p><i>Tt<sub>i</sub>: Tiempo transcurrido desde que el mensaje corto es enviado, hasta que ha sido recibido por el usuario destino, medido en segundos.</i></p> <p><i>Me: Número total de mensajes cortos enviados.</i></p>	$Tm \leq 20 \text{ s}$	Mensual

**Tabla 2.1. Parámetros de calidad del SMA en Ecuador**

## 2.2. Reglamento para las radiaciones no ionizantes en Ecuador

Las radiaciones no ionizantes incluyen a todas aquéllas que no tengan la suficiente energía para producir la ionización de materia; caracterizadas por la energía por fotón menor a 12 eV, longitudes de onda mayores a 100 nm, y frecuencias menores a  $3 \times 10^{15}$  Hz [13].

Según la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones del Ecuador – ARCOTEL, las emisiones electromagnéticas de la telefonía móvil en el país se controlan en base a la normativa ecuatoriana y las recomendaciones de organismos internacionales [14]:

- Límites de referencia definidos por la Comisión Internacional sobre la protección contra radiaciones no ionizantes [13].
- Recomendación “Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos” definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones [15].
- Recomendación “Supervisión de los niveles de intensidad del campo electromagnético” definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones [16].
- Reglamento de protección de emisiones de radiación no ionizante generadas por uso de frecuencias del espectro radioeléctrico, emitido con Resolución 01-01-CONATEL-2005 [17].

Mediante estas recomendaciones y normativa vigente, los organismos internacionales y de regulación y control ecuatoriano ofrecen protección para la salud de todas las personas y que son pertinentes a todas las tecnologías móviles, incluyendo LTE. Las características básicas de las señales LTE con respecto a la exposición son comparables a las de las tecnologías móviles predecesoras; las mismas que tienen que ver, principalmente, con la potencia de transmisión así como con la gama de frecuencias del espectro. En efecto, las bandas de frecuencia

que emplea LTE se han asignado antes a otros servicios móviles o radioeléctricos, como la televisión [18].

Por lo tanto, las evaluaciones de los riesgos para la salud que existen en la actualidad son válidas para toda la banda de frecuencias hasta 300 GHz, independiente de la tecnología móvil (GSM, UMTS, LTE).

En abril de 2010, la Agencia Federal Alemana para la Protección frente a la radiación evaluó LTE en respuesta a una pregunta en el parlamento alemán y concluyó que las frecuencias que maneja esta tecnología son contiguas a las bandas de frecuencia analizadas anteriormente en el marco del programa alemán de investigación sobre telecomunicaciones móviles por lo que no se prevén diferencias significativas con respecto a los posibles efectos biológicos en comparación con las frecuencias utilizadas en tecnologías anteriores [19].

No es necesario establecer nuevos límites de exposición segura debido al funcionamiento de las redes LTE ya que las actuales pautas internacionales de seguridad para tecnologías de radiocomunicación son válidas para todas las frecuencias en la que se despliega esta red. Estas pautas son reconocidas por la Organización Mundial de la Salud y se establece que no tienen ninguna consecuencia para la salud. Mediciones realizadas en antenas LTE han dado como resultado valores de exposición típico similar a los de las tecnologías inalámbricas predecesoras y otras fuentes como la televisión [13].

Con respecto a los estándares de seguridad para dispositivos LTE, son los mismos que aplican para los teléfonos móviles de cualquier tecnología en general. Los dispositivos LTE incluyen módems de datos, teléfonos inteligentes y tabletas. Las pautas de exposición para teléfonos o dispositivos móviles que se usan cerca de la cabeza o el cuerpo especifican el nivel máximo de energía de radiofrecuencia que puede ser absorbido con un margen amplio de seguridad. El término usado para indicar la cantidad de energía de radiofrecuencia que absorbe el cuerpo o la cabeza durante una llamada telefónica o durante el uso de un dispositivo móvil es

la Tasa de Absorción Específica (SAR), la misma que se expresa en unidades de watts por kilogramo (W/Kg) [20].

### **2.3. Evolución de la red de telefonía Celular**

Para entender la tecnología que actualmente se utiliza en las comunicaciones celulares es necesario conocer ciertos detalles que dieron origen al nacimiento y despegue de este tipo de comunicación. Este detalle se lo divide en dos: sistemas móviles pre-celulares y sistemas móviles celulares.

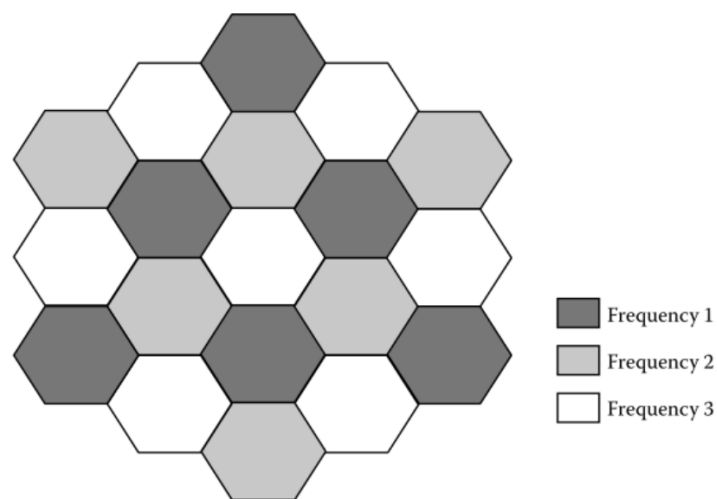
#### **2.3.1. Sistemas móviles Pre-Celulares**

El 13 de mayo de 1897, Marconi transmitió las primeras señales inalámbricas sobre el agua desde Flat Holm hasta Lavernock (8 millas de distancia). El 17 de octubre de 1907 inició el servicio radio-telegrafía trasatlántico y en 1929 el servicio comercial de radio-telefonía para pasajeros de buques en el Atlántico. Para ese tiempo, los radios eran pequeños y lo suficientemente resistentes como para ser instalados en los automóviles, y es así que el primer sistema de radio "móvil terrestre" se puso en funcionamiento por parte de la policía de Detroit en 1928. En 1934, ya había 194 sistemas de policías municipales y 58 estaciones de radio policía estatal atendiendo a más de 5.000 carros de policía equipados con radio. La era del radio móvil había comenzado [21].

En julio de 1945 la FCC (Comisión Federal de Comunicaciones, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos discutió el futuro de la comunicación inalámbrica en un artículo titulado "Phone me by Air" en el que hacía referencia de un sistema radio celular para establecer comunicaciones bidireccionales vía radio en la banda de 460MHz. El artículo en mención hacía referencia al reuso frecuencial en áreas pequeñas, lo que implicaba que miles de usuarios en todo el país pudieran tener acceso a utilizar estos canales sin interferencias. A pesar de que la FCC no concedió el espectro, en su momento, para llevar a cabo este servicio, se continuó el estudio de los

sistemas celulares llegados a ser implementados posteriormente, con el mecanismo de reuso de frecuencia como principal elemento [22].

Las redes celulares aparecen para la mejor utilización del espectro de radio y el incremento de las áreas de cobertura. Cada celda usa un conjunto diferente de frecuencias de las celdas vecinas, para evitar interferencias y proveer un ancho de banda garantizado dentro de cada celda como se aprecia en la Figura 2.2.



**Figura 2.2. Red de comunicación celular**

En 1981, el sistema NMT (Telefonía Móvil Nórdico, por sus siglas en inglés), lanzó simultáneamente en Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suecia y fue la primera red de telefonía móvil en ofrecer itinerancia internacional. En 1982 la FCC autoriza el uso comercial de las frecuencias de radio, una vez comprobado que el sistema propuesto de “telefonía celular” funciona, y un año después Ameritech, pone a disposición de la ciudad de Chicago el primer sistema analógico de telefonía móvil celular de uso comercial usando el novedoso teléfono DynaTAC de Motorola. Algunos países siguieron esta tendencia a mediados de los 80s incluyendo Reino Unido, México y Canadá [21].

### **2.3.2. Sistemas móviles celulares**

Los sistemas de comunicación móviles celular revolucionaron la forma en que las personas se comunican, tanto es así que las tecnologías de acceso inalámbrico han evolucionado hoy en día hasta su cuarta generación (4G) con miras a llegar en unos cuantos años más a alcanzar la quinta generación (5G). Haciendo una retrospectiva, las tecnologías de acceso inalámbrico siguieron diferentes caminos evolutivos que apuntaban a satisfacer objetivos relativos al desempeño y eficiencia en ambientes de alta movilidad. La primera generación (1G) alcanzó a desarrollar a gran escala los sistemas analógicos de comunicación inalámbrica, mientras que la segunda generación (2G) introdujo conceptos de capacidad y cobertura. La tercera generación (3G) tuvo la misión de aumentar el tráfico de datos y aumentar las velocidades de transmisión para hacer experimentar por primera vez el ancho de banda móvil a los suscriptores. La cuarta generación (4G) provee acceso a una amplia gama de servicios de telecomunicaciones incluyendo servicios móviles avanzados, soportados por redes móviles y fijas, basadas en paquetes y soportadas por aplicaciones de alta movilidad y de tasas de transmisión de datos altas. La quinta generación (5G) aún no está estandarizada pero pretende ser una tecnología inteligente que interconecte a todo el mundo [23]. A continuación en esta sección se amplían las características 3G, 4G y 5G.

#### **Generación 3G**

Para los sistemas de comunicación de tercera generación, el desafío eran la globalización y la convergencia de aplicaciones y servicios de la oficina y el hogar con la ayuda de nuevas herramientas. La variedad de los sistemas de comunicación en el mercado, debido a las diferentes ubicaciones geográficas, sus propias economías, política y temas regulatorios y sociales, hacían difícil brindar a todos los componentes del sistema un solo punto de convergencia común.



La ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones, por sus siglas en inglés) empezó el desarrollo de un sistema de tercera generación cuyo plan era el de implementar una frecuencia global en la banda de los 2000 MHz y que soporte un solo estándar de comunicación inalámbrico para todos los países del mundo. Este plan se llamó Telefonía Móvil Internacional 2000 (IMT-2000) [23].

La tercera generación proporciona velocidades de transmisión de 144Kb/s para usuarios de gran movilidad, 384 Kb/s para usuarios en espacios abiertos y 2Mb/s para entornos interiores con usuarios de baja movilidad. Con estas velocidades, los usuarios pueden tener acceso a una variedad de servicios desde llamadas telefónicas, acceso a internet, envío y recepción de correos electrónicos, transferencia de archivos e imágenes de calidad e incluso servicios de video conferencia y transmisión de audio y video en tiempo real [24].

El estándar de mayor popularidad para 3G fue UTRA-UMTS y la tecnología dominante, W-CDMA. La primera publicación del sistema UMTS estuvo disponible en 1999 conocida como Release 99, especificando dos modos: El modo Duplexación por División de Frecuencia (FDD, por sus siglas en inglés) que emplea la técnica de acceso W-CDMA (CDMA-Banda Ancha), donde el canal físico lo define un código y una frecuencia, y el modo Duplexación por División de Tiempo (TDD, por sus siglas en inglés) empleando la técnica de acceso TD-CDMA (CDMA-División de Tiempo), donde el canal físico lo define un código, una frecuencia y una ranura de tiempo. [25].

Las tecnologías de la tercera generación permitían a los operadores ofertar una amplia gama de servicios avanzados mientras alcanzaban mejores capacidades de red mediante una mayor eficiencia espectral. Los servicios incluían: servicios de telefonía inalámbrica de voz en áreas amplias, llamadas de video, ancho de banda para datos inalámbricos, televisión móvil, sistema de posicionamiento global (GPS) y video conferencia, todo en un ambiente

móvil. Con respecto a las generaciones anteriores, 3G presentaba las siguientes mejoras [23]:

- Mejoras en transmisión de audio y video
- Mayores velocidades de los datos
- Soporte para video conferencia
- Mayor velocidad en los buscadores web
- Soporte para Televisión por Internet (IPTV)

### **3.5 G – HSDPA**

En las características del acceso radio UMTS se incorporan mejoras importantes a través del protocolo de telefonía HSDPA (Acceso de Paquetes del Enlace Descendente a Alta Velocidad, por sus siglas en inglés), por medio del cual se permiten mayores tasas de transferencia de datos. HSDPA es un servicio de datos basado en paquetes W-CDMA de enlace descendente con tasa de transmisión hasta de 8-10 Mb/s y hasta 20 Mb/s para sistemas MIMO (Múltiples entradas-Múltiples salidas, por sus siglas en inglés) sobre anchos de banda de 5 MHz.

Las implementaciones de HSDPA incluyen AMC (Modulación y Codificación Adaptativa, por sus siglas en inglés), MIMO, HARQ (Solicitud Híbrida Automática, por sus siglas en inglés), búsqueda rápida de celdas y diseño avanzado del receptor [26].

### **3.75 G – HSUPA**

Se refiere a las tecnologías que están un poco más allá a las definidas para 3G y es una evolución en los paquetes UMTS/W-CDMA en enlace ascendente y de ahí la denominación de HSUPA (Acceso de Paquetes en Enlace Ascendente a Alta Velocidad, por sus siglas en inglés), y está

directamente relacionada con la HSDPA siendo complementarias la una con la otra.

HSUPA mejora las aplicaciones avanzadas de datos persona a persona con altas y tasas de transmisión simétricos como el correo móvil y las aplicaciones de juego en tiempo real persona a persona. Además, se benefician también las aplicaciones de negocio tradicional debido a las mejores tasas en enlace ascendente, entre 1.4 Mb/s o 5.8 Mb/s dependiendo de la versión [26].

### **Generación 4G**

La cuarta generación (4G) fue mentalizada para superar por mucho las velocidades de acceso de los dispositivos móviles. Las primeras versiones de prueba exitosas de 4G fueron realizadas en Tokio, Japón el 23 de Junio de 2005 cuando la empresa de telecomunicaciones NTT consiguió alcanzar la transmisión de paquetes de 1Gb/s en tiempo real en enlace descendente a una velocidad de movimiento de 20Km/h. En marzo de 2008, la Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector Radiocomunicaciones (ITU-R, por sus siglas en inglés), creó un grupo de estándares para que una red sea considerada de 4G conocidos como la especificación Telecomunicaciones Móviles Internacionales Avanzado (IMT-Advanced, por sus siglas en inglés) [27].

En este sentido, según la ITU-R, para que un sistema de comunicación celular sea considerado como de cuarta generación debía, entre otros requisitos, consistir en una red basada completamente en conmutación por paquetes con una arquitectura plana basada en el protocolo IP, tener velocidades de transferencia de datos mayores a 100Mb/s para altas movilidades y de 1Gb/s para entornos relativamente fijos, tener menores tiempos de latencia, además de ofrecer interoperabilidad con otros estándares existentes [28].

Para usar los servicios de 4G, los terminales de usuario deben ser capaces de seleccionar el sistema inalámbrico a usar. En los actuales sistemas GSM, las estaciones base periódicamente envían mensajes de señalización masivos para la suscripción de las estaciones móviles; sin embargo, este proceso se vuelve complicado en sistemas heterogéneos 4G debido a las diferencias en las tecnologías inalámbricas y los protocolos de acceso. Para proveer servicios inalámbricos a cualquier hora y en cualquier lugar, se debe garantizar la movilidad del terminal en la infraestructura 4G ya que esto permite que los suscriptores puedan lograr itinerancia a través de las fronteras geográficas de las redes inalámbricas.

Hay dos temas principales a considerar en la movilidad del terminal: la gestión de la localización y la gestión del traspaso. En la gestión de la localización, el sistema sigue y localiza el terminal móvil para posibles conexiones, esto involucra manejar toda la información acerca de los terminales itinerantes, tales como celdas originales de partida, celdas actuales e información de autenticación. Por el otro lado, la gestión del traspaso, mantiene las comunicaciones en curso cuando el terminal cruza una celda a otra [23].

A continuación se resumen los temas considerados que caracterizan las tecnologías móviles de cuarta generación [26]:

- Características embebidas IP con propósitos de seguridad en el envío y recepción de datos de alta velocidad a través del teléfono
- Descarga de datos a tasas de 100 Mb/s en accesos de movilidad y para menos movilidad, descargas a tasas de 1 Gb/s
- Introducción de su propia tecnología de acceso inalámbrico OFDMA, en lugar de los híbridos usados en 3G. En OFDMA, el concepto es de acceso múltiple por división pero no es ni por tiempo (TDMA), ni por código (CDMA) sino que es un proceso en el dominio de la frecuencia, en donde

los paquetes de datos se envían dividiendo el canal en bandas estrechas para mayor eficiencia. Ésta es una de las características más destacadas de la tecnología móvil 4G.

- Diseño y optimización de técnicas de acceso radio que evolucionaron los sistemas existentes en la época y así que la organización 3GPP estableció las bases de los estándares para una futura evolución a largo término LTE (por sus siglas en inglés). Adicional a LTE, 3GPP introdujo otro estándar inalámbrico IEEE802.16m conocida como WiMAX.

Adicionalmente, LTE está acompañado por una evolución de aspectos que no son de radio y que completan el sistema bajo el término SAE (Evolución de la Arquitectura del Sistema, por sus siglas en inglés) la que incluye la red EPC (Núcleo de Paquetes Evolucionados, por sus siglas en inglés). Juntos, LTE y SAE abarcan la EPC, en donde el núcleo de la red y el acceso de radio son conmutados por paquetes.

La primera versión de LTE estuvo disponible en la Release 8 dentro de las especificaciones 3GPP y estuvo disponible para beneficiar el entendimiento y desarrollo de las tecnologías HSPA y HSPA+, especialmente en relación a las optimizaciones de los protocolos mientras era libre de adoptar nuevas tecnologías diferentes sin las preocupaciones de la compatibilidad o del ancho de banda de la portadora de 5MHz. Una segunda versión de LTE fue desarrollada en el Release 9, hasta que en el Release 10 se dio inicio al siguiente nivel conocido actualmente como LTE-Advanced.

Hubo una segunda evolución en cuando a organizaciones asociadas similares a 3GPP conocida como 3GPP2; en ésta se desarrolla CDMA2000 basado en el estándar americano IS-95, el cual fue el primer sistema de comunicación celular móvil en utilizar la tecnología CDMA y fue desarrollado principalmente en Estados Unidos, Corea y Japón. Es importante mencionar que LTE provee una estrecha compatibilidad con otros sistemas

desarrollados por 3GPP2, lo que permite una migración sin problemas a LTE para operadores que previamente estaban acostumbrados a sistemas de 3GPP2.

El tercer y último camino de esta evolución emergió del comité de estándares de la IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, por sus siglas en inglés) que creó la familia 802.16 como un estándar de acceso inalámbrico de banda ancha, totalmente orientado a paquetes y que normalmente es referido como WiMAX. La primera versión, conocida como 802.16-2014 estuvo restringida para accesos fijos, mientras que la siguiente versión 802.16e incluye soporte básico para la movilidad por lo que se la conoce como WiMAX móvil. Cabe mencionar que la familia WiMAX no fue diseñada con el mismo énfasis en movilidad y compatibilidad con el núcleo de las redes de los operadores como lo hizo la familia de la tecnología 3GPP, la que incluye evoluciones de núcleo de red así como evolución al acceso de radio.

Es así que el patrón general es una evolución del radio móvil hacia sistemas multiservicio, flexibles y orientado a paquetes. A donde se dirigen todos estos sistemas es a ofrecer una experiencia de usuario que pueda alcanzar lo que actualmente ofrecen las redes de acceso fijo como la ADSL (Línea de Suscripción Digital Asimétrico, por sus siglas en inglés) y la FTTH (Fibra Hacia El Hogar, por sus siglas en inglés).

### **Generación 5G**

5G es el término utilizado para describir a los sistemas inalámbricos de quinta generación, usado en algunos artículos y proyectos de científicos, para denotar la próxima fase de los estándares de sistemas móviles que estarán más avanzados que los estándares de cuarta generación. Actualmente, 5G no es un término oficialmente utilizado por ninguna especificación o documento oficial de cuerpos de estandarización como 3GPP, WiMax Forum o ITU-R.

Los teléfonos móviles 5G tendrán acceso a diferentes tecnologías inalámbricas al mismo tiempo y vendrán con resoluciones increíblemente altas por lo que se estima que estos dispositivos soportarán aplicaciones como canales de TV digital, transportación inteligente, video móvil de alta resolución y sin interrupciones [26]. Adicionalmente, los usuarios podrán enganchar sus teléfonos 5G con sus laptops para tener acceso a internet de banda ancha y como estos teléfonos vendrán equipados con mejores cámaras y reproductores de audio y video MP3, mayores capacidades de almacenamiento podrán explotar eficazmente estas aplicaciones.

A lo largo de esta sección, se han descrito cada una de las generaciones de la telefonía móvil celular desde la primera hasta la quinta generación. A continuación, en la Tabla 2.2, se presenta una comparación resumida entre todas las generaciones y sus características más importantes:

<b>Generación</b>	<b>Inicio / Desarrollo</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Tecnologías</b>	<b>Multiplexación</b>	<b>Características</b>
<b>1G</b>	1970 – 1980	14.4 Kb/s	AMPS, NMT, TACS	FDMA	Para servicios inalámbricos de voz
<b>2G</b>	1990 – 2004	64 Kb/s	TDMA, CDMA, GPRS,	TDMA, CDMA	Múltiples usuarios podían acceder al servicio en un solo canal de comunicación vía multiplexación. Los servicios ofrecidos eran de datos y voz.
<b>3G</b>	2004 – 2010	2 Mb/s	CDMA2000, EDGE, UMTS, HSPA	W-CDMA	Ofrece servicios multimedia y se introduce conceptos de acceso universal y mejoras de movilidad.
<b>4G</b>	Actualmente	1 Gb/s	WiMAX, LTE, Wi-Fi	OFDMA	Las velocidades de acceso se ajustan a las demandas crecientes en portabilidad, transmisión de audio y video y acceso a internet.
<b>5G</b>	Probablemente en 2020	Mayor a 1 Gb/s	Por definirse	Por definirse	Proveerá de velocidades muy altas a los suscriptores y un uso más eficiente del ancho de banda.

**Tabla 2.2. Comparación resumida entre generaciones de tecnología móvil 1G - 5G**



## 2.4. Conceptos básicos de una red LTE

Como ya se indicó en la sección 2.3.2, el sistema LTE fue diseñado por la organización 3GPP con la idea de incrementar en gran medida las capacidades que ofrecían los sistemas de comunicaciones móviles anteriores. En ese sentido, LTE es el primer sistema en dar soporte a las necesidades actuales de los usuarios en convergencia de servicios y tiempos de descarga más altos, manejando anchos de banda de 180KHz durante un 1ms, logrando calidad de servicio y la experiencia del usuario como medio de ayuda a la mejora de las condiciones de la red para mejorar el QoS, con el uso de controladores de la red de radio [29].

LTE fue estandarizado por 3GPP en sus Releases 8 y 9 para luego estandarizar el sistema IMT avanzado conocido como LTE-Advanced en los Releases 10 y 11, luego ratificada por la UIT-R en noviembre de 2010. LTE-Advanced es una evolución de LTE, tecnología basada en OFDMA, que es apoyado por un ecosistema enorme de los fabricantes y operadores en todo el mundo. Algunas de las características de LTE [29]:

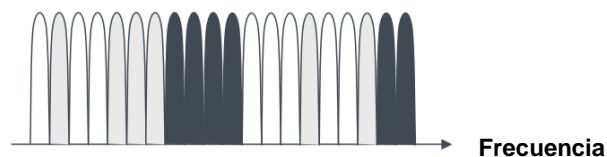
- Canalización flexible que permite alcanzar altas velocidades de transmisión de 100Mb/s en enlace descendente y de 50Mb/s en el ascendente.
- Facilita la migración gradual hacia LTE de bandas espectrales ocupadas por 2G y 3G.
- Latencia del plano de usuario en la red de acceso radio inferior a 10ms
- Ancho de banda escalable
- Interoperabilidad con sistemas 3G y sistemas no 3GPP.

En vista de que el ancho de banda de 20MHz, necesario para alcanzar velocidades de transmisión de hasta 100Mb/s, introduciría elevadas distorsiones debido a la interferencia intersimbólica (ISI) ocasionada por la propagación multi-camino, se adoptó la técnica de acceso múltiple OFDMA para el enlace descendente permitiendo dividir el espectro en múltiples portadoras de banda estrecha

ortogonales entre sí con una separación fija de 15KHz. Incluso usando OFDMA queda presente cierta interferencia, por lo tanto se emplea un prefijo cíclico que permite eliminar la ISI ofreciendo de esta manera una gran eficiencia espectral [30].

Para el servicio en enlace ascendente se adoptó una variante de OFDMA llamada SC-FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia - Portadora Simple, por sus siglas en inglés) que presenta una considerable reducción de la relación entre la potencia instantánea transmitida y la potencia media, denominada PAPR, evitando circuitos en el amplificador de frecuencia de los dispositivos móviles, lo que provoca el aumento en el consumo de su batería [28]. En la Figura 2.3 se muestra la distribución de la frecuencia en el canal descendente y ascendente.

**Enlace descendente OFDMA**



**Enlace ascendente SC-FDMA**

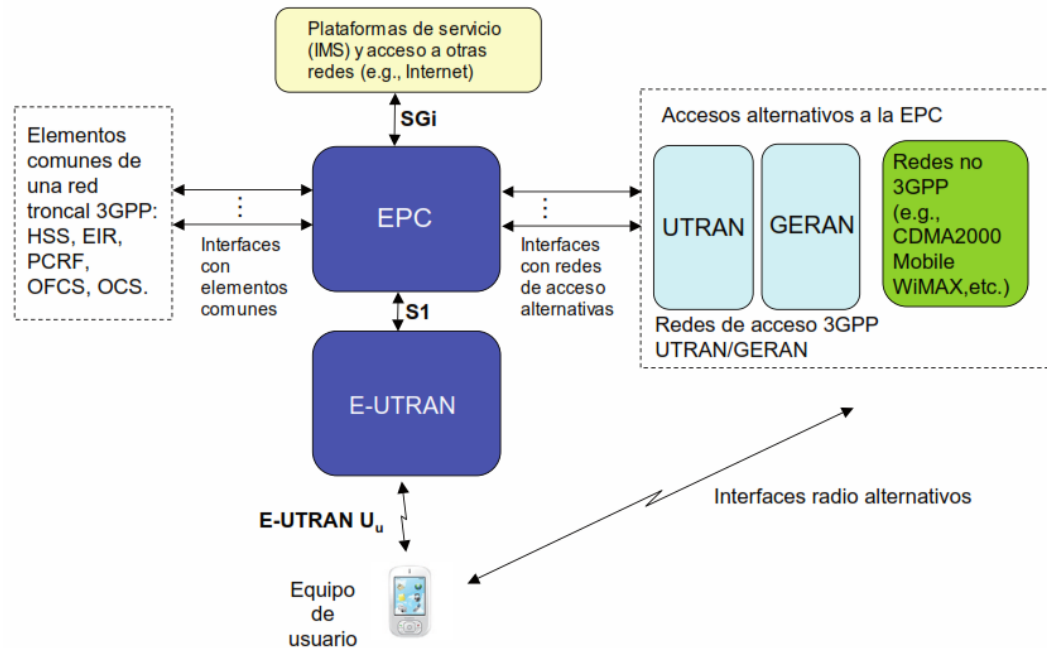


**Figura 2.3. Dominio frecuencial de las tecnologías de acceso múltiple en enlace descendente y ascendente**

## 2.5. Arquitectura de una red LTE

La arquitectura del sistema LTE se diseñó en función de tres requisitos fundamentales: conmutación en paquetes, baja latencia y costos reducidos. Para poder cumplir estos requisitos se planteó una arquitectura plana sin ningún nivel de jerarquización y con la menor cantidad de nodos e interfaces posibles; siendo esta arquitectura LTE basada en una nueva red de acceso denominada E-UTRAN (Red de Acceso Radio Terrestre UMTS – Evolucionada, por sus siglas en inglés) y una

nueva red troncal denominada EPC. La combinación de la red de acceso y la red troncal recibe el nombre de EPS (Sistema de Paquetes Evolucionados, por sus siglas en inglés), ver Figura 2.4.



**Figura 2.4. Arquitectura del sistema LTE**

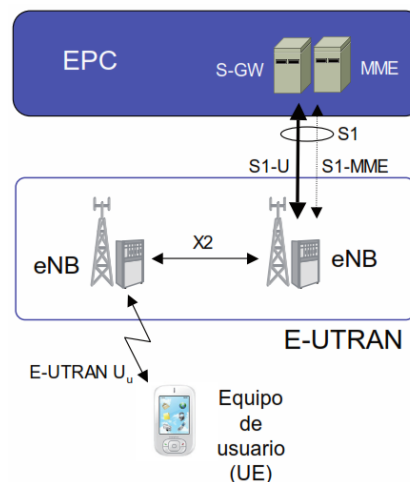
Entre E-UTRAN y EPC se encuentra la interfaz S1, la que proporciona a la EPC los mecanismos que permiten gestionar el acceso de los dispositivos móviles a través de E-UTRAN; entre los UEs y la E-UTRAN se encuentra la interfaz radio E-UTRAN Uu. Por otro lado, las plataformas de servicios como IMS y la conexión a redes de paquetes externas IP se lleva a cabo mediante la interfaz SGi de la EPC, siendo esta interfaz el punto de entrada/salida al servicio de conectividad IP proporcionado por la red LTE.

Otra de las características principales de LTE es que contempla el acceso a sus servicios a través de UTRAN y GERAN así como mediante el uso de otras redes de acceso que no pertenecen a la familia 3GPP como lo son CDMA2000, WiMAX o las

redes 802.11. Esta interconexión a redes de acceso alternativas, sean de 3GPP o no, se soporta a través de un conjunto de interfaces de la EPC.

### 2.5.1. Arquitectura de E-UTRAN

El eNB (Nodo B evolucionado) constituye la estación base de la E-UTRAN y es en donde se realizan todas las funciones de la red de acceso que en las redes 3GPP anteriores se llevaba a cabo por las estaciones base junto a sus controladores de red (BTS y BSC en GSM, NodoB y RNC en UMTS), de allí que sea denominada como arquitectura plana. En este sentido, las funciones que realizan los eNBs incluyen la gestión de recursos radio, compresión de cabeceras, seguridad en la interfaz radio y conectividad con la red troncal EPC.



**Figura 2.5. Arquitectura de E-UTRAN**

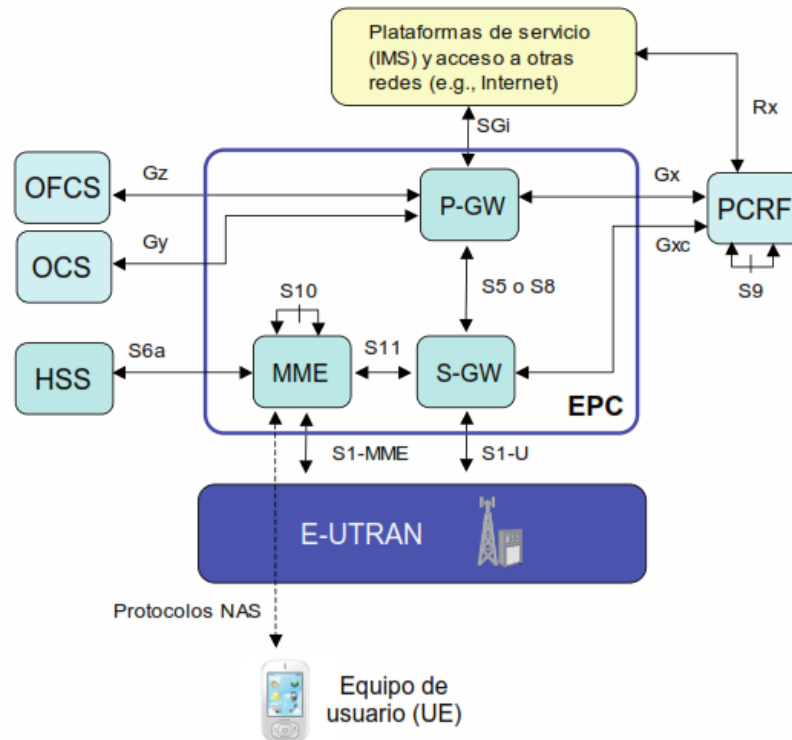
Tal como se muestra en la Figura 2.5, el eNB se comunica con el resto de los elementos del sistema mediante las siguientes tres interfaces: E-UTRAN U<sub>u</sub>, S1 y X2. La interfaz de radio LTE, la E-UTRAN U<sub>u</sub>, permite la transferencia de información por el canal de radio entre el eNB y los UEs. Todas las funciones y protocolos necesarios para realizar el envío de datos y controlar la operatividad de la interfaz E-UTRAN se implementan en el eNB. Los eNBs

normalmente se interconectan entre ellos por medio de la interfaz X2, para el intercambio de mensajes de señalización que permiten una gestión más eficiente del uso de los recursos radio así como el tráfico de usuarios cuando estos se desplazan de un eNB a otro durante el proceso de traspaso.

Los eNBs se conectan a la red troncal EPC a través de la interfaz S1, la misma que está subdividida en dos interfaces diferentes: S1-MME para sustentar el plano de control y S1-U como soporte del plano de usuario. Esta separación entre el plano de control y plano de usuario, es una característica importante en la organización de los protocolos que están asociados a las interfaces de la red LTE ya que establece la comunicación del eNB con dos nodos diferentes de la red troncal. Así, a través de la interfaz S1-MME, el eNB se comunica con el MME (Entidad de Administración de la Movilidad, por sus siglas en inglés) que es la entidad de red de la EPC encargada únicamente de sustentar las funciones relacionadas con el plano de control, mientras que, a través de la interfaz S1-U, el eNB se comunica con el S-GW (Gateway de Servicio, por sus siglas en inglés), que es la entidad encargada de procesar el plano de usuario [29].

### **2.5.2. Arquitectura EPC**

La red troncal EPC ha sido diseñada de tal manera que pueda proporcionar un servicio de conectividad IP mediante una arquitectura de red optimizada y que permita explotar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN. Tal como se muestra en la Figura 2.6, los elementos principales del EPC son: MME, S-GW y el P-GW, pero además de estas entidades se encuentran también el HSS (Servidor de suscripción de Hogar, por sus siglas en inglés), el PCRF (Función de Control de las Políticas y Reglas de Cobro, por sus siglas en inglés), el OFCS (Sistema de Cobro Fuera de Línea, por sus siglas en inglés) y el OCS (Sistema de Cobro En Línea, por sus siglas en inglés) [28].



**Figura 2.6. Arquitectura básica de la red troncal EPC**

Según [29] el MME realiza las funciones y señalización del plano de control entre el UE y la red troncal donde se soportan los protocolos NAS (Estrato Sin Acceso, por sus siglas en inglés). Las funciones principales del MME son el establecimiento, mantenimiento y liberación de los Bearers (servicios portadores) así como el establecimiento de la conexión y la seguridad entre la red y el UE. Por otro lado, las funciones asociadas al plano de usuario se concentran en el S-GW y el P-GW, quienes además se encargan de servir de anclaje para la gestión de movilidad entre LTE y redes 3GPP y no 3GPP respectivamente. El HSS es la base de datos principal que contiene la información de los subscriptores tales como los perfiles de QoS (Calidad del Servicio, por sus siglas en inglés), las restricciones de itinerancia, información permanente y dinámica del usuario, etc. Por su lado, el PCRF controla los servicios portadores que ofrece la red LTE y los mecanismos de cobro.

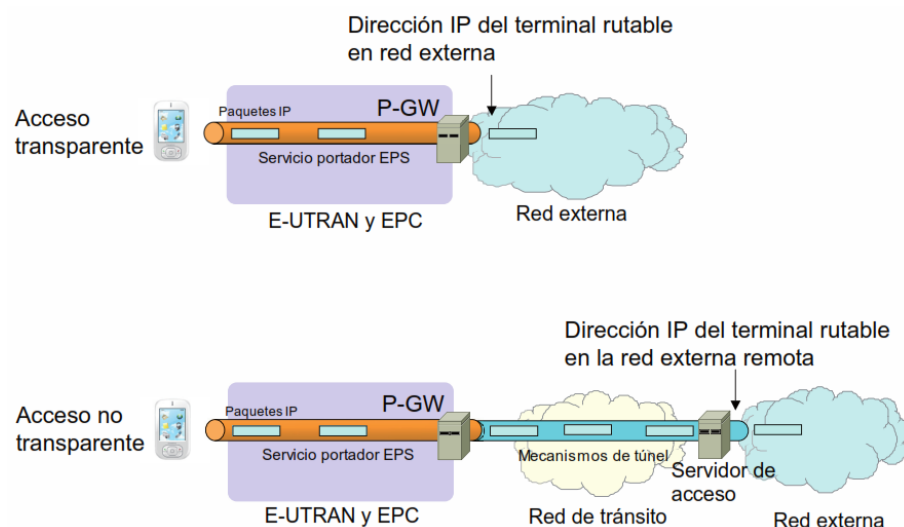
Las entidades OFCS y el OCS mostradas en la Figura 2.6 constituyen el núcleo de la tarificación de la red, y ambas interactúan directamente con el P-GW ofreciendo un marco flexible de cobro en base a diferentes parámetros como el tiempo de uso y el volumen de datos [29].

Las diferentes interfaces de la red troncal EPC con la red de acceso E-UTRAN y demás elementos y plataformas de la red LTE, se describen a continuación.

### **Interfaz P-GW ↔ Redes Externas (SGi)**

A través de la interfaz SGi se realiza la interconexión del P-GW de la red LTE con redes externas IP que pueden ser tanto pública como cualquier otra red privada y puede soportar la interconexión tanto a redes IPv4 como IPv6.

Desde la perspectiva de red externa, y como se lo muestra en la Figura 2.7 el P-GW es visto como un enrutador IP convencional; sobre esta base, existen dos modelos básicos de interconexión de la red LTE con la red externa: acceso transparente y acceso no transparente.



**Figura 2.7. Tipos de interconexión a través de SGi**

Bajo el modelo de interconexión transparente, la dirección IP asignada al dispositivo de usuario es válida en la propia interfaz SGi con la red externa, de forma que el dispositivo es “visible” en la red externa a la que proporciona acceso el P-GW a través de dicha dirección. En cambio, en el modelo no transparente, la red LTE ofrece un acceso a una red externa remota de forma que el espacio de direcciones utilizado por los dispositivos pertenece al espacio de direcciones de la red externa remota.

La conexión entre la red LTE y la red remota admite diferentes soluciones como el establecimiento de un túnel IP (como IPSec) entre el P-GW y el servidor de acceso remoto. En el modelo no transparente, puede ser necesario que el P-GW participe, por ejemplo, en funciones de autenticación de usuario y asignación de direcciones dinámicas pertenecientes a la red remota [31].

#### **Interfaces P-GW ↔ S-GW (S5 y S8)**

Ambas interfaces, S5 y S8, proporcionan el soporte para la transferencia de paquetes de usuario entre los S-GW y P-GW. Mientras que la interfaz S5 se utiliza en situaciones donde el S-GW y el P-GW pertenecen a la misma red, la interfaz S8 se utiliza en itinerancia donde el S-GW pertenece a la red visitada y el P-GW a la red matriz [32].

#### **Interfaz MME ↔ S-GW (S11)**

Permite establecer el nexo del plano de control con las funciones del plano de usuario de la red troncal LTE desde la entidad de red MME, soportando procedimientos que permiten la creación, eliminación, modificación y cambio de los servicios portadores que los dispositivos tienen establecidos a través de la red troncal LTE [32].



### **Interfaz MME ↔ MME (S10)**

Esta interfaz se define entre dos entidades MME y su principal función es la de dar soporte al mecanismo de reubicación de la entidad MME, de tal manera que cuando ésta debe cambiarse (debido, por ejemplo, a su movilidad), se realiza la transferencia del contexto del usuario entre MMEs a través de esta interfaz [32].

### **Interfaz HSS ↔ MME (S6a)**

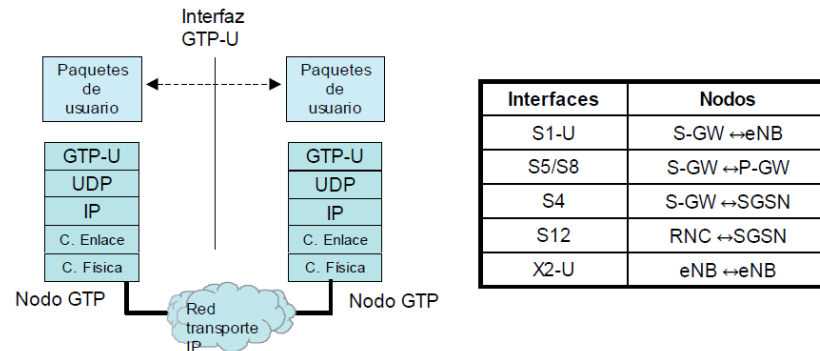
Permite la transferencia de información entre la base de datos HSS y la entidad del plano de control MME de la troncal EPC dando soporte a diferentes funciones como: mantenimiento de información de gestión de la localización, autorización de acceso a la red LTE, autenticación de usuarios, notificación y descarga de la identidad del P-GW que utiliza un usuario en una conexión. Adicionalmente, soporta escenarios de itinerancia en donde una entidad MME de la red de un operador puede acceder a la base de datos HSS de otro operador [32].

A continuación, los protocolos de la red EPC utilizados en las diferentes interfaces según lo descrito en esta sección.

### **GTP-U**

El protocolo GTP-U da respuesta al servicio GPRS por lo que soporta el plano de usuario entre los nodos de red de este dominio así como el plano de usuario de la interfaz lu-PS de UTRAN. Proporciona un mecanismo de encapsulado para el envío de paquetes de usuario entre nodos de una red IP.

Según la Figura 2.8 todas las interfaces para el transporte de información de plano de usuario entre los diferentes elementos de la red troncal EPC se soportan a través de este protocolo, exceptuando la variante de la interfaz S5/S8 basada en PMIPv6 [33].

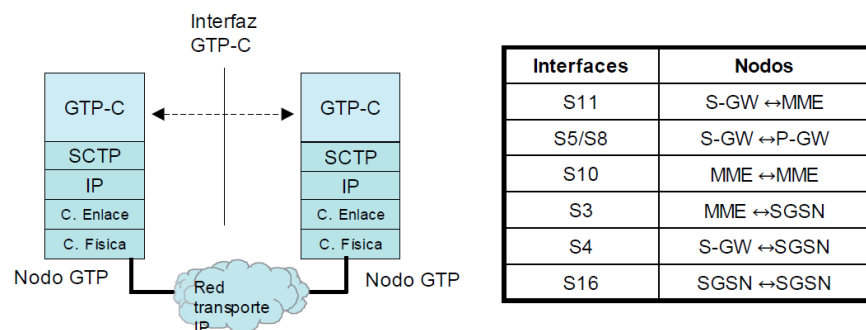


**Figura 2.8. Interfaces basadas en GTP-U**

### **GTP-C**

La Figura 2.9 muestra las interfaces del protocolo, el cual soporta un conjunto de funciones que pueden clasificarse en torno a los siguientes aspectos:

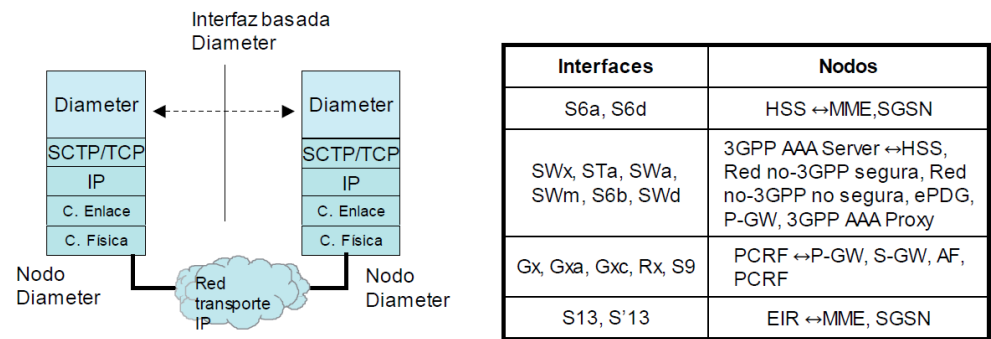
- Gestión de sesiones. A través de los mensajes y procedimientos de señalización especificados para GTP-C, la red gestiona la creación de túneles GTP-U entre las entidades de la red por donde transcurre el plano de usuario.
- Gestión de movilidad. Mediante este protocolo se ejecutan procedimientos como la transferencia de los contextos de información de los usuarios entre las entidades de red en casos de reubicación de las mismas.



**Figura 2.9. Interfaces basadas en GTP-C**

La versión del protocolo GTP-C utilizada en las interfaces LTE, se especifican en [34].

### Diameter



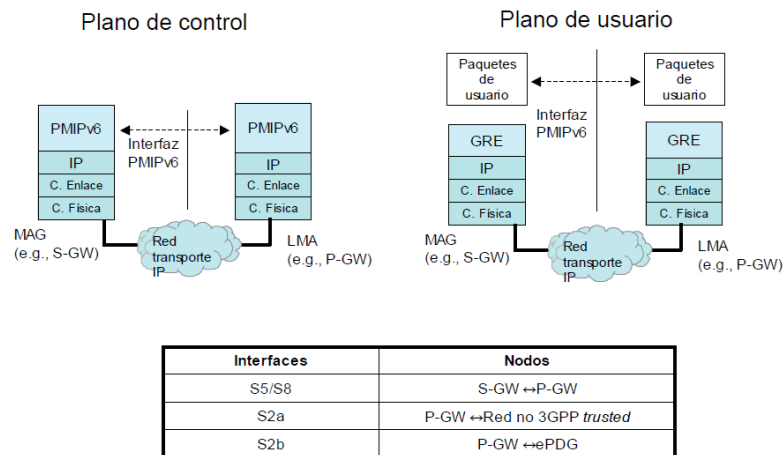
**Figura 2.10. Interfaces basadas en Diameter**

Las interfaces del protocolo Diameter se muestran en la Figura 2.10. Es una evolución del protocolo RADIUS, inicialmente conocido para sustentar funciones AAA (Autenticación, Autorización y Contabilidad, por sus siglas en inglés). Este protocolo se utiliza en interfaces del sistema LTE, las que se muestran en la Figura 2.10. La transferencia de los mensajes Diameter entre nodos se realiza a través de un protocolo de transporte orientado a conexión como TCP o SCTP [35].

El protocolo aporta funcionalidades como formatos de mensajes e información genérica, mecanismos de transferencia de mensajes, descubrimiento de capacidades de las entidades Diameter y aspectos de seguridad. Entre las extensiones o aplicaciones de Diameter más relevantes se encuentran el NASA (Aplicación de Servidor de Acceso de Red, por sus siglas en inglés) en el marco de control de acceso a redes y el CCA (Aplicación de Control de Crédito, por sus siglas en inglés) para la implementación de sistemas de tarificación en línea.

## **PMIPv6**

El protocolo Proxy MIPv6 (PMIPv6) es un protocolo utilizado para gestionar la movilidad a nivel de capa de red IP. Este protocolo ha sido adoptado por 3GPP para su utilización en la interfaz S5/S8 entre los Gateway S-GW y P-GW, como alternativa al uso del protocolo GTP especificado por 3GPP.

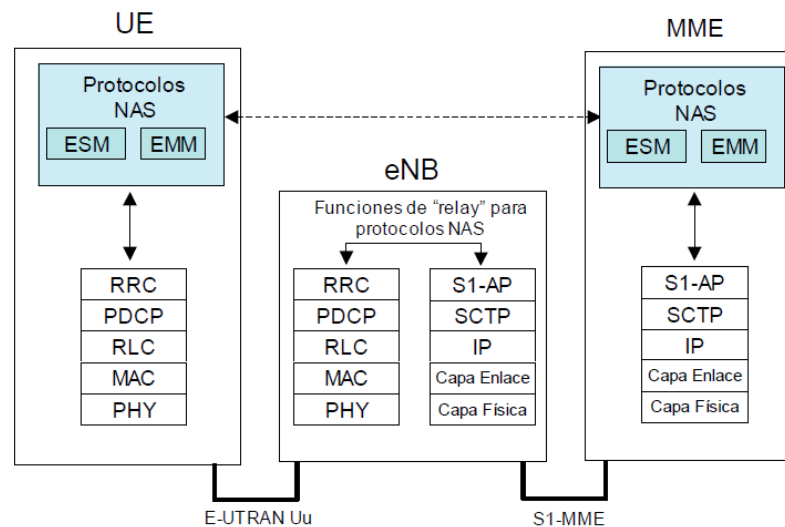


**Figura 2.11. Interfaces basadas en PMIPv6**

Resuelve la movilidad de forma transparente al equipo de usuario, es decir, sin necesidad de que éste participe en la señalización pertinente sino que lo hace por medio de la red. En la Figura 2.11 se muestran las interfaces basadas en este protocolo.

## **NAS**

Los protocolos están desarrollados por la Organización 3GPP para ejecutar la gestión de movilidad de los equipos de usuario y la gestión de las sesiones para el establecimiento de la conectividad entre el equipo y el P-GW. Estos protocolos se soportan entre el equipo de usuario y un nodo MME y se muestran en la Figura 2.12.

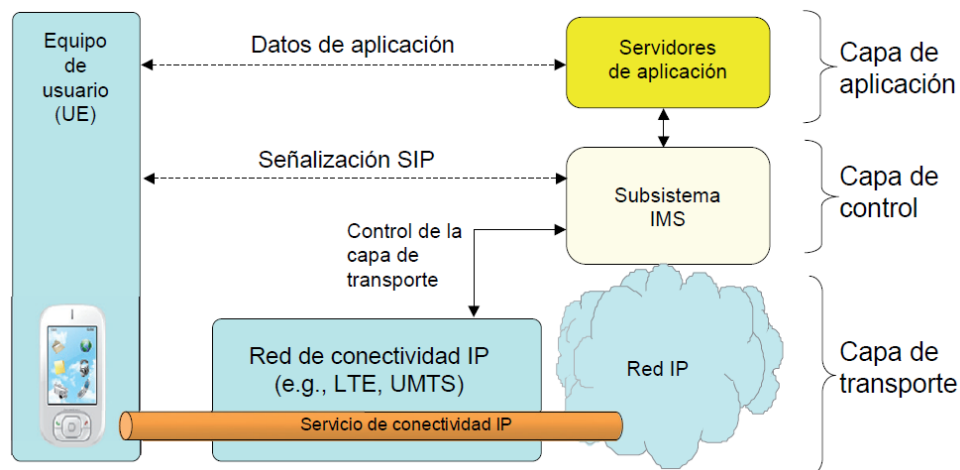


**Figura 2.12. Protocolos NAS entre equipo de usuario y MME**

### 2.5.3. Sistema multimedia IP (IMS)

El IMS (Subsistema Multimedia IP, por sus siglas en inglés) provee los mecanismos de control que se requieren para la provisión de servicios de comunicación multimedia basados en la utilización del protocolo IP a los usuarios de la red LTE [29], permitiendo gestionar la provisión de servicios de voz y video sobre IP, mensajería instantánea, servicio de llamadas en grupo, entre otros. El acceso de los equipos de usuario se realiza a través de los servicios de conectividad IP que proporciona la red LTE.

La adopción de este mecanismo en LTE se facilita en gran medida debido a la interconexión de diferentes redes de telecomunicaciones ya sean móviles o fijas, públicas o privadas, y que también se basen en dichos protocolos. La Organización 3GPP escogió el protocolo SIP (Protocolo de Inicio de Sesión, por sus siglas en inglés) como la base para soportar la señalización asociada al subsistema IMS [36].



**Figura 2.13. Modelo de provisión de servicios en base al subsistema IMS**

El modelo de provisión de servicios de IMS se estructura en tres capas: transporte, control y aplicación (ver Figura 2.13). La capa de transporte representa la infraestructura de red IP, dependiente de la tecnología de acceso, que proporciona la ruta del flujo de datos IP entre equipos de usuario y demás elementos de la red. En la capa de control se ubican los elementos especializados en la gestión de sesiones tales como los servidores de señalización SIP, así como otros elementos específicos para la interacción con redes telefónicas convencionales. Es importante mencionar que los servicios de conectividad IP proporcionados por la capa de transporte pueden ser controlados desde la capa de control.

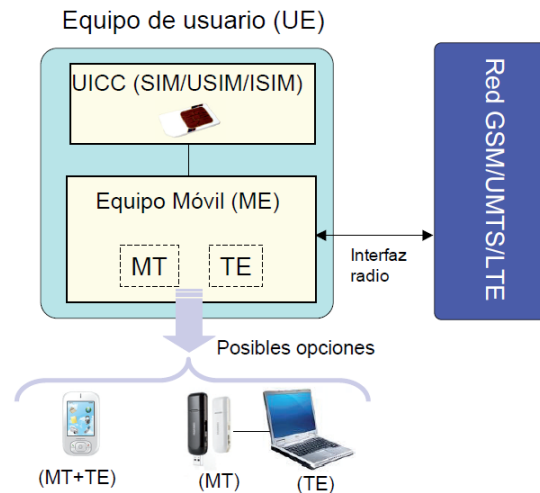
Por último, en la capa de aplicación residen los servidores de aplicación que albergan la lógica y datos asociados a los diferentes servicios proporcionados a través de IMS. En esta capa también se pueden encontrar elementos relacionados a otras plataformas de servicios como de redes inteligentes. A través de estas plataformas se posibilita la provisión de servicios desde proveedores de aplicaciones externos denominados ASPs (Proveedores de Servicios de Aplicación, por sus siglas en inglés).

LTE utiliza SIP para el establecimiento y liberación de sesiones a través de IMS complementado con una serie de extensiones definidas por la Organización 3GPP, esto debido a que es un protocolo se concibió para sesiones multimedia sobre redes IP entre dos o más participantes; aunque, gracias a su flexibilidad, en la actualidad el ámbito de aplicación de SIP abarca una gama de aplicaciones mucho más extensa como mensajería instantánea, juegos distribuidos o control remoto de dispositivos.

El subsistema IMS contempla mecanismos que permiten la interoperabilidad con servicios equivalentes ofrecidos a través de redes de conmutación de circuitos, como la red telefónica convencional, y por eso un suscriptor LTE puede establecer llamadas de voz a través de IMS con un usuario de la red telefónica conmutada. En una llamada de estas características, la transmisión de voz del suscriptor LTE se soporta mediante una solución de voz sobre IP a través del servicio de conectividad proporcionado por la red LE, e IMS se encarga de realizar la conversión de códecs necesarios para establecer el circuito telefónico.

#### **2.5.4. Equipo de Usuario**

El UE (equipo de usuario, por sus siglas en inglés) es el terminal que permite a los suscriptores LTE acceder a los servicios de la red a través de la interfaz radio. Este equipo contiene dos elementos básicos (ver Figura 2.14): un módulo de suscripción del usuario (SIM/USIM) y el equipo móvil propiamente dicho. Además, las funciones del equipo móvil se pueden agrupar en dos instancias funcionales que son: la terminación móvil (MT) y el equipo terminal (TE).



**Figura 2.14. Equipo de usuario**

El módulo de suscripción de usuario se realiza mediante el uso de la tarjeta inteligente UICC que contiene la aplicación que gestiona los datos de suscripción de los usuarios a las redes 3GPP. Esta aplicación se denomina SIM (Módulo de Identidad del Subscriptor, por sus siglas en inglés), mientras que en UMTS se llama USIM. La SIM/USIM está asociada a un usuario y por tanto es quien lo identifica en el sistema independientemente del equipo móvil utilizado.

## 2.6. Interfaz de Radio de una red LTE

A través de la interfaz de radio se realiza la interconexión de la llamada, el tráfico de los datos y la señalización entre el terminal de usuario y las estaciones base eNBs y de aquí a su vez a la red troncal a través de la interfaz S1 [28].

En esta sección se describen las principales funciones y características de esta interfaz a través de los mecanismos físicos utilizados para la transmisión y recepción tanto de la información de usuario como de la señalización y finalmente se describe lo relacionado a la capa física y los mecanismos relacionados.



### **División funcional**

Como ya se mencionó en la Sección 2.5.1, los eNBs se conectan a la red troncal EPC a través de la interfaz S1, la misma que se desdobra en dos interfaces diferentes: la una para conectarse con el nodo encargado de las funciones de control en la red troncal denominado MME (S1-MME) y otro que se encarga de las funciones de transferencia de los paquetes de usuario entre el eNB y en la red troncal a través del gateway de servicio S-GW (S1-U). De manera opcional los eNBs pueden conectarse entre sí mediante la interfaz X2, que permite, entre otras funciones, transferir paquetes de usuario entre eNBs durante el traspaso de llamadas.

### **Protocolos de la interfaz**

La pila de protocolos de la interfaz de radio del sistema LTE se articula en dos planos:

- Plano de usuario, para el envío y recepción de información propia del usuario e interconectado al S-GW mediante los denominados S1 Bearer (Servicios Portadores S1, por sus siglas en inglés). Los protocolos utilizados en el plano de usuario se resumen en la Tabla 2.3:

<b>Protocolo</b>	<b>Función</b>
PDCP	<i>Protocolo de Convergencia de Paquete de Datos, por sus siglas en inglés.</i> Permite la compresión de las cabeceras de los paquetes IP, y la entrega/recepción ordenada de los paquetes IP desde y hacia las capas superiores que están ubicadas en el S-GW.
RLC	<i>Control de Enlace de Radio, por sus siglas en inglés.</i> Permite establecer un enlace fiable a través de la interfaz.
MAC	<i>Control de Acceso al Medio, por sus siglas en inglés.</i> Permite un acceso ordenado de los diferentes equipos de

Protocolo	Función
	usuario al medio de transmisión.
Capa física	Proporciona el mecanismo físico para transmitir y recibir a través del espectro radioeléctrico.

**Tabla 2.3. Protocolos de plano usuario**

- Plano de control o señalización, para transportar los mensajes de control intercambiados entre la red y el equipo de usuario e interconectado al nodo MME.

El plano de control comparte con el plano de usuario los protocolos PDCP, RLC, MAC y capa física, e incorpora un protocolo llamado RRC (Control de Recurso Radio, por sus siglas en inglés) que se encarga de gestionar la conexión, a nivel radio, entre el equipo de usuario y el eNB, de la configuración de los servicios portadores, y del envío de mensajes relacionados con la movilidad desde y hacia el equipo de usuario [28].

Los protocolos PDCP, RLC y MAC se consideran protocolos de capa 2 o de capa de gestión de enlace, ya que administran el comportamiento y las prestaciones del enlace radio; mientras que el protocolo RRC se lo considera un protocolo de capa 3, ya que gestiona funcionalidades a nivel de red. El protocolo de capa física se lo considera como de capa 1.

Finalmente, la interrelación de los diferentes protocolos se hace a partir de los denominados canales lógicos, de transporte y físicos.

### **2.6.1. Canales lógicos**

Los canales lógicos se establecen entre la capa RLC y la MAC y se utilizan para describir el tipo de información de usuario y/o señalización que se transmite a través de la interfaz aire. Este tipo de canales se dividen en

canales lógicos de tráfico y canales lógicos de control, los mismos que se describen en la Tabla 2.4 y la Tabla 2.5 [28].

<b>Canales</b>	<b>Descripción</b>
DTCH	<p><i>Canal de Tráfico Dedicado, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Existe tanto en el enlace ascendente como en el descendente y transfiere información entre el eNB y un terminal móvil determinado. La información transferida puede ser de usuario o de señalización a nivel de aplicación asociada a un flujo de datos de usuario.</p>
MTCH	<p><i>Canal de Tráfico Multipunto, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Existe solo en el enlace descendente y transmite información desde el eNB a un grupo determinado de usuarios; típicamente utilizado para implementar el servicio MBMS (Servicio Multipunto y de Difusión Ampla de Multimedia, por sus siglas en inglés)</p>

**Tabla 2.4. Canales lógicos de tráfico**

<b>Canales</b>	<b>Descripción</b>
BCCH	<p><i>Canal de Control de Difusión Ampla, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Existe solo en el enlace descendente. El eNB lo utiliza para transmitir a los terminales móviles bajo su cobertura información sobre el sistema, como la identificación del operador o celda, o mensajes de emergencia.</p>
PCCH	<p><i>Canal de Control de Localización, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Existe solo en el enlace descendente. El eNB lo utiliza para notificar a los terminales móviles de una llamada, para localización, o actualización de información de sistema.</p>
CCCH	<p><i>Canal de Control Común, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Existe tanto en el enlace ascendente como en el</p>

Canales	Descripción
	descendente, y permite la comunicación entre el eNB y el terminal móvil cuando todavía no se ha establecido una conexión a nivel de RRC. Se utiliza para enviar información de control en las fases iniciales del establecimiento de la conexión.
DCCH	<i>Canal de Control Dedicado, por sus siglas en inglés.</i> Existe tanto en el enlace ascendente como en el descendente, y que sirve para transmitir información de control dedicada relacionada a un terminal móvil, una vez que se dispone de una conexión a nivel de RRC.
MCCH	<i>Canal de Control Multipunto, por sus siglas en inglés.</i> Existe solo en el enlace descendente, y se utiliza para transmitir información de control desde el eNB a un grupo de usuarios que reciben servicio MBMS.

**Tabla 2.5. Canales lógicos de control**

### 2.6.2. Canales de transporte

Los canales de transporte se establecen entre la capa MAC y la capa física aportando flexibilidad a la interfaz aire, permiten multiplexar diferentes canales lógicos en un solo canal de transporte. Este tipo de canales se clasifican en función de su uso en el enlace descendente o el ascendente, los mismos que se describen en la Tabla 2.6 y la Tabla 2.7.

Canales	Descripción
BCH	<i>Canal de Difusión Amplia, por sus siglas en inglés.</i> Es utilizado para transportar las partes del sistema de información que son esenciales para acceder al DL-SCH. El formato de transporte es fijo y la capacidad, limitada.

<b>Canales</b>	<b>Descripción</b>
DL-SCH	<p><i>Canal Compartido de Enlace Descendente, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Transporta señal de usuario de señalización, o mensajes de control; además transporta partes del sistema de información que no se transmiten a través de BCH.</p>
PCH	<p><i>Canal de Localización, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Transporta la señal en toda el área de cobertura de la celda y permite informar a los terminales móviles de actualizaciones de información del sistema o enviar mensajes de emergencia.</p>
MCH	<p><i>Canal Multipunto, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Transmite en toda el área de cobertura de la celda y es usado para transportar los datos de usuario del servicio MBMS.</p>

**Tabla 2.6. Canales de transporte de enlace descendente**

<b>Canales</b>	<b>Descripción</b>
UL-SCH	<p><i>Canal Compartido de Enlace Ascendente, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Este canal es utilizado para transportar datos de usuario en enlace descendente o mensajes de control.</p>
RACH	<p><i>Canal de Acceso Aleatorio, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Este canal es utilizado para acceder a la red cuando el terminal móvil no precisa de sincronización en el tiempo de enlace ascendente, o cuando el terminal móvil no tiene ningún recurso de transmisión de enlace ascendente</p>

Canales	Descripción
	asignado.

**Tabla 2.7. Canales de transporte de enlace ascendente**

### 2.6.3. Capa física

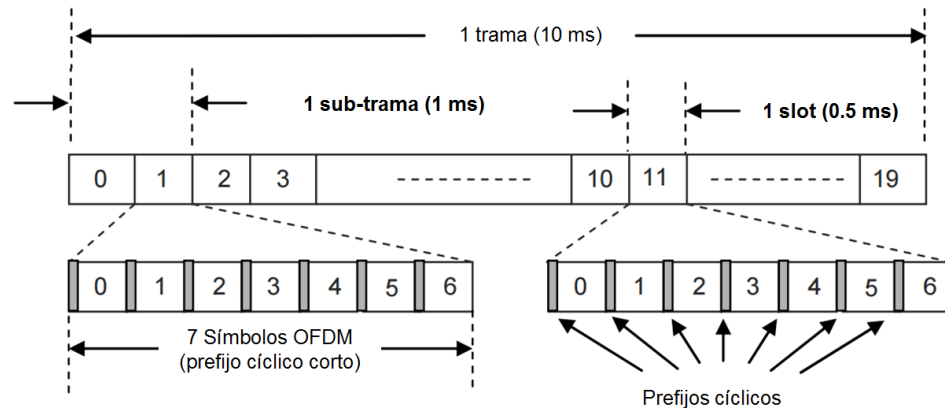
En la capa de los canales físicos se encuentran los mecanismos de transmisión y recepción a través del enlace de radio tanto de la información del usuario como de la propia señalización del sistema y se basa en la utilización de técnicas de acceso múltiple OFDMA en el enlace descendente y SC-FDMA en el ascendente; en ambos esquemas la separación entre subportadoras es fija e igual a 15 KHz. Estas tecnologías de acceso a nivel físico se describen en la Sección 2.5.

La interfaz de aire en LTE comprende de canales físicos y señales físicas. Las señales físicas se crean en la capa física y se usan para la sincronización del sistema, identificación de la celda, y estimación del canal de radio. Los canales físicos se usan para transportar los datos de control o de usuario y las señales descendentes son un poco diferentes a las ascendentes por lo que a continuación se las describe de manera separada [37].

#### **Estructura genérica de la trama**

Un elemento que está compartido por los canales físicos en los enlaces descendente y ascendente es la estructura genérica de la trama, la misma que en el contexto de LTE se usa con FDD (Duplexación por División de Frecuencia, por sus siglas en inglés).

Como se detalla en la Figura 2.15, las tramas LTE tienen una duración de 10 ms y se dividen en 10 sub-tramas, de 1 ms de duración. Cada sub-trama luego se divide en dos ranuras (o slots), cada una de 0.5 ms de duración; cada uno de estos slots consisten de 6 o 7 símbolos OFDM dependiendo de si se emplea el prefijo cíclico normal o extendido.



**Figura 2.15. Estructura de trama genérica**

Los canales físicos están asociados a canales de transporte específicos y son los que se describen en la Tabla 2.8:

Canales	Descripción
PDSCH	<p><i>Canal Físico Compartido, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Transmite los SIBs (Bloques de información del sistema, por sus siglas en inglés), e información entregada por la capa MAC mediante el canal de transporte DL-SCH. Los esquemas de modulación que se utilizan son: QPSK, 16QAM y 64QAM.</p>
PMCH	<p><i>Canal Físico de Multidifusión, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Este canal transporta información MBMS en redes SFN (Redes de frecuencia simple, por sus siglas en inglés), es decir, en celdas que dan soporte a este servicio utilizando todas las mismas frecuencias.</p>
PDCCH	<p><i>Canal Físico de Control, por sus siglas en inglés.</i></p> <p>Este canal transporta los DCIs (Información de control de enlace descendente, por sus siglas en inglés) que contienen información de asignación de recursos para los canales PCH y DL-SCH y está formado por uno o varios CCEs (Elementos de control del canal, por sus siglas en inglés).</p>

Canales	Descripción
	Un CCE puede transmitir el esquema de modulación utilizado, información sobre el ajuste del control de potencia o la versión de redundancia aplicada.
PBCH	<i>Canal Físico de Difusión Amplia, por sus siglas en inglés.</i> Este canal utiliza modulación QPSK, y transporta información básica sobre la red.
CCPCH	<i>Canal Físico de Control Común, por sus siglas en inglés.</i> Este canal contiene información de control de toda la celda y se transmite tan cerca de la frecuencia central como sea posible.
PCFICH	<i>Canal Físico Indicador del Formato de Control, por sus siglas en inglés.</i> Se usa para informar al equipo de usuario el número de símbolos OFDM en el canal PDCCH por sub-trama.

**Tabla 2.8. Canales físicos de enlace descendente**

Las señales físicas usan elementos asignados y a diferencia de los canales físicos, éstas no contienen información que van desde o hacia las capas superiores. Hay dos tipos de señales físicas:

- Señales de referencia que se usan para estimar la respuesta al impulso del canal (CIR).
- Señales de sincronización que contienen información de los tiempos de la red y que se usan para búsqueda en la red e identificación de los terminales móviles de los usuarios.

## 2.7. Tecnologías de nivel físico

Las tecnologías de nivel físico son las que permiten conseguir los niveles de capacidad y eficiencia espectral en el uso de los recursos radio en LTE. En esta



sección se aborda la modulación OFDM para luego detallar las técnicas de acceso OFDMA y SC-FDMA.

### 2.7.1. OFDM

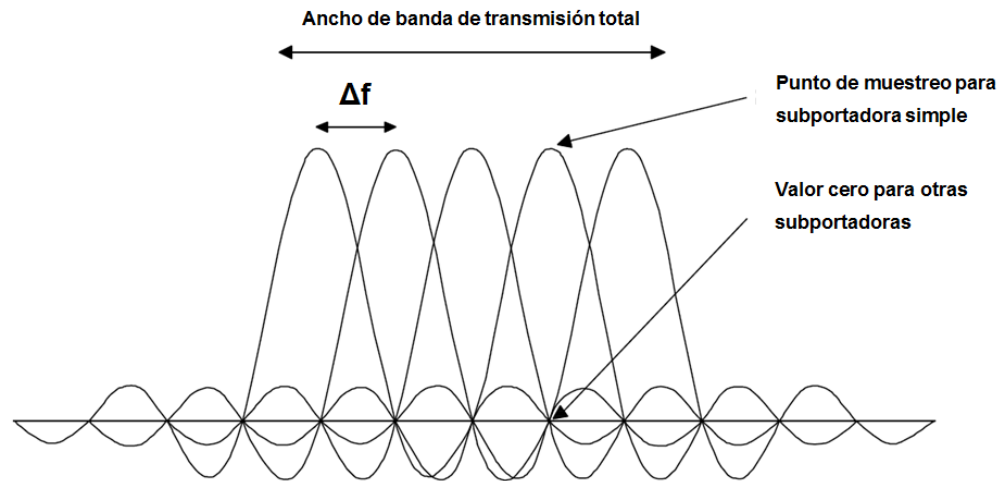
La Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal, (OFDM, por sus siglas en inglés) es un tipo de multiplexación por división de frecuencia (FDM, por sus siglas en inglés) que se usa como una técnica de modulación digital de múltiples portadoras. La propiedad única de OFDM es la ortogonalidad entre las subportadoras, lo que se obtiene de dividir la portadora en canales más pequeños ortogonalmente espaciados, reduciendo así la interferencia entre portadoras. Gracias a OFDM, el diseño del transmisor y del receptor se hace más sencillo comparado con el método FDM, el cual requiere que se utilice un banco de filtros separados para cada subportadora [38].

OFDM es ampliamente utilizado en aplicaciones de redes móvil celular, en redes fijas de banda ancha, entre otras, además es la base para las técnicas de acceso múltiple OFDMA y SC-FDMA, que se describen en la Sección 2.7.2 y 0 respectivamente.

En OFDM la trama de datos a ser transmitida se divide en tramas de datos paralelas, las cuales alimentan a las subportadoras ortogonales a tasas de transmisión más bajas; cada subportadora se modula usando cualquiera de los esquemas de modulación digital conocidos como QPSK, 16QAM, 64QAM u órdenes de modulación más altos dependiendo de la calidad de la señal requerida.

Los símbolos corresponden a toda la información de control y datos que se transmiten en una trama OFDM. Si se considera que los símbolos a ser transmitidos son  $X_k$ , para  $k = 0, 1, \dots, N-1$ , estos se colocan en un espacio de frecuencia  $f_s$  para mantener la ortogonalidad en la subportadora, de esta manera:  $f_s = \frac{1}{NT_s}$ , donde  $N$  es el número de muestras y  $T_s$  es el intervalo de

muestreo. La señal OFDM a ser transmitida a través de  $K$ -ésimas subportadoras está dada por  $x_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi nk/N}$ .



**Figura 2.16. Espectro OFDM**

La combinación lineal de las señales instantáneas en cada una de las subportadoras constituyen los símbolos OFDM. El espectro de la señal OFDM se muestra en la Figura 2.16. Al inicio de cada símbolo OFDM se añade un período de guarda añadiendo un prefijo cíclico (CP) el cual se lo usa efectivamente para eliminar la interferencia intersimbólica (ISI), causada por la propagación multi-camino, y por ende las subportadoras se hacen tan apretadas espacialmente para una eficiente utilización del ancho de banda disponible. [39].

En la Figura 2.16 se puede apreciar que la componente más importante de cada subportadora no se traslapa con las demás y que entre subportadoras vecinas existe una separación  $\Delta f$ .

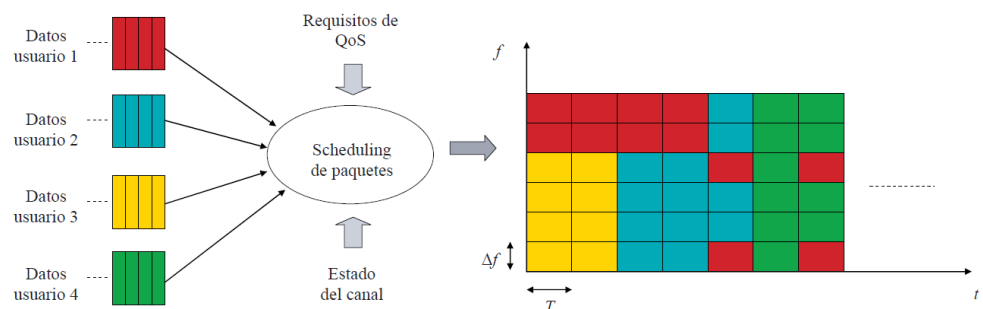
### 2.7.2. OFDMA

Basado en diferentes ventajas que se han mencionado en la Sección 2.7.1, OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal, por sus

siglas en inglés) es considerado como el esquema de acceso múltiple ideal para el enlace descendente LTE [28]. OFDMA utiliza múltiples subportadoras ortogonales, cada una se modula de manera separada, y las distribuye a diferentes usuarios al mismo tiempo de tal manera que múltiples usuarios puedan ser programados para recibir los datos simultáneamente; usualmente, las subportadoras se ubican en grupos continuos por simplicidad y para reducir el número de pasos de asignación de subportadoras a cada uno de los usuarios.

Lo anterior está relacionado a la programación de los paquetes (Packet Schedule, en inglés), que es uno de los mecanismos de gestión de los recursos radio (RRM), para decidir cómo estos recursos se distribuyen entre los diferentes usuarios y los servicios asociados. El proceso se ilustra en la Figura 2.17 y, como puede apreciarse, existe un conjunto de datos que están asociados a cuatro usuarios diferentes, representados cada uno mediante un color, y un conjunto de recursos en una malla con ejes en frecuencia y tiempo, con subportadoras separadas  $\Delta f$ , asignadas durante un período  $T$ .

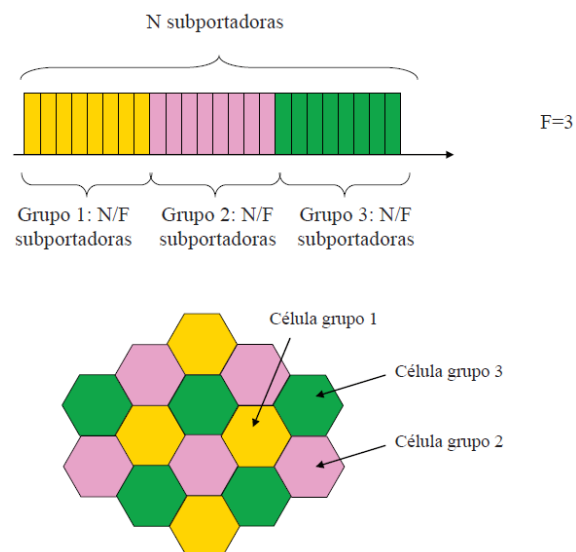
Dependiendo de los requisitos de calidad de servicio (QoS), se disponen más subportadoras asignadas durante más tiempo a los diferentes usuarios; mientras que la información del estado del canal permite asignar eficientemente un usuario a una subportadora cuyo canal no presente problemas de interferencia o atenuación.



**Figura 2.17. Programación de paquetes en OFDMA**

Uno de los problemas de los sistemas celulares es determinar qué recursos radio se asignan a las diferentes estaciones base para conseguir que cada una de éstas disponga de la suficiente capacidad de acuerdo a la cantidad de usuarios que deba dar servicio, utilizando eficientemente los recursos. Esta asignación de recursos a las estaciones base está completamente ligada a la técnica de acceso múltiple utilizada.

Para el caso de los sistemas celulares basados en OFDMA, como en LTE, en donde la banda total se subdivide en un conjunto de subportadoras, presentando intrínsecamente un componente FDMA, da lugar a técnicas de reutilización de frecuencia. En este caso, el conjunto total de subportadoras disponible se subdivide en  $F$  grupos (siendo  $F$  el factor de reuso), asignándose una celda diferente de un conjunto  $F$  de celdas. Este conjunto de  $F$  celdas se denomina clúster; y, cada uno de los grupos se reutiliza en celdas pertenecientes a diferentes clústeres. En la Figura 2.18 se presenta un ejemplo con factor de reuso  $F=3$ , mecanismo que garantiza que celdas contiguas no trabajen con las mismas subportadoras y por ende que no se interfieran entre sí.

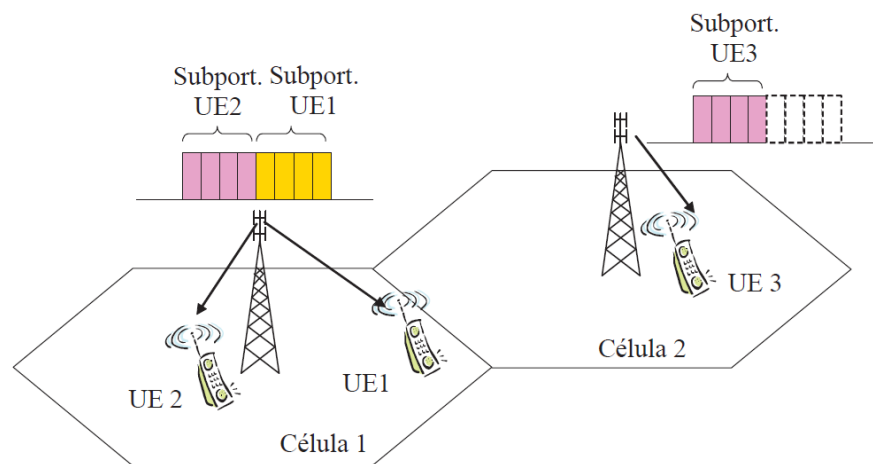


**Figura 2.18. Asignación de subportadoras a celdas con  $F=3$**

Se observa que si se incrementa el valor de  $F$ , se consigue alejar más las celdas que utilizan la misma frecuencia y por tanto se reduce la interferencia intercelular; esto, a costa de que el número de subportadoras por celda se reduce, traduciéndose en una reducción de la capacidad de la celda.

En base a la técnica de programación de paquetes y de adaptación de enlace, se pueden efectuar dentro de la celda una gestión dinámica de las subportadoras disponibles, asignándolas a los usuarios según sus condiciones de canal medidas, no solo como relación señal a ruido sino como relación señal a ruido más interferencia. Así, en OFDMA, la interferencia intercelular no se controla únicamente mediante el reuso de frecuencias sino que también se puede regular mediante una programación de paquetes apropiado. Por este motivo, es posible trabajar con factores de reuso inferiores, pudiendo llegar incluso a utilizarse un factor  $F=1$ , esto es, asignar todas las subportadoras disponibles en todas las celdas.

Para el caso en el que todas las subportadoras disponibles están asignadas a todas las celdas, con un factor de reuso  $F=1$ , es tarea de la programación de paquetes asignar apropiadamente las subportadoras a los usuarios de modo que a aquellos usuarios más susceptibles a la interferencia intercelular, como los que se encuentran en los bordes de la celda, se les asignen subportadoras que en un momento dado no estén siendo utilizadas en las celdas adyacentes, mientras que a los usuarios menos susceptibles a la interferencia intercelular, como los que se encuentran cerca de la estación base, se les asigne subportadoras utilizadas en otras celdas.



**Figura 2.19. Ejemplo de OFDMA con reuso  $F=1$**

En la Figura 2.19, se muestra la operación de un sistema celular OFDMA con reuso  $F=1$ , los terminales móviles que están muy cerca de sus respectivas estaciones base (UE2 y UE3) pueden utilizar el mismo conjunto de subportadoras, mientras que en caso de la terminal que se encuentra en el extremo de la celda 1 (UE1), el algoritmo de programación de paquetes selecciona un conjunto de subportadoras que no están siendo utilizadas por la celda 2 para que el terminal UE1 no pueda percibir un exceso de interferencia.

### 2.7.3. SC-FDMA

El Acceso Múltiple por División de Frecuencia – Portadora Única (SC-FDMA, por sus siglas en inglés), es un esquema de multiplexación usado para la transmisión en enlace ascendente en LTE con ventajas como el mejoramiento de la eficiencia espectral, menos complejidad de ecualización en el receptor, o adaptación flexible del ancho de banda. El arreglo de antenas MIMO tienen un rol muy importante en que esto sea posible y alcanzar los objetivos marcados en 3GPP para LTE [28].

Uno de los aspectos que se tomaron en cuenta para escoger SC-FDMA como el método de acceso múltiple para el canal ascendente en LTE, fue la necesidad de contar con variaciones reducidas en la potencia instantánea de la señal transmitida en términos de PAPR (Tasa de Potencia Pico sobre Potencia Promedio, por sus siglas en inglés), para conseguir una mayor eficiencia en los amplificadores de potencia y menores costos de los dispositivos móviles [29].

SC-FDMA conjuga este aspecto con la posibilidad de llevar a cabo de forma sencilla mecanismos de ecualización en el dominio de la frecuencia, además de tener la capacidad de asignar una banda flexible que se puede variar de forma sencilla de acuerdo con las diferentes necesidades de transmisión de los usuarios.

Los procedimientos de gestión de recursos asociados al enlace ascendente para SC-FDMA son similares a los empleados por OFDMA, en tanto que ambas técnicas de acceso se basan en principios de transmisión parecidos; por lo que también se disponen de mecanismos de programación de paquetes y de adaptación de enlace para saber cuáles son los recursos asignados en cada momento a un usuario, los formatos de modulación y codificación de canal a emplear. Sin embargo, la estimación de canal en el enlace ascendente es más complejo que en el descendente, ya que implica la necesidad de disponer de señales de referencia que se envíen desde cada uno de los equipos de usuario involucrados en el proceso de programación, que se traduce en un incremento en la señalización del sistema.

## **2.8. MIMO**

Con aplicaciones que incluyen transmisión de video en alta definición, banca móvil, medios sociales, buscadores web a toda capacidad y otras aplicaciones celulares de banda ancha y que proveen experiencias de alto nivel para los consumidores, crean nuevos retos para el manejo eficiente del ancho de banda por parte de los

operadores. Con la intención de ampliar las capacidades de la red inalámbrica disponible, y como el espectro radioeléctrico es un recurso finito, la industria de las telecomunicaciones se ve en la necesidad de apuntar a nuevas tecnologías que permitan aprovechar el ancho de banda existente.

Mientras que las comunicaciones inalámbricas tradicionales (SISO – Entrada simple – Salida simple, por siglas en inglés), explotan técnicas de procesamiento y codificación en el dominio del tiempo o la frecuencia, el uso de elementos de antena adicionales tanto en el lado de la estación base (eNB) o del equipo de usuario (UE) abre un espacio extra dimensional para la codificación y detección de señales. Los métodos de procesamiento en tiempo y espacio explotan esta dimensión apuntando a mejorar el desempeño del enlace en términos de uno más métricas posibles como la tasa de error, la tasa de datos, área de cobertura y la eficiencia espectral (expresada en bps/Hz) [28].

En LTE los operadores generan mayor eficiencia de canal (throughput) en el ancho de banda existente usando técnicas estándar de uso de antena; pero es posible mejorarlo ampliando y optimizando este espectro mediante técnicas de múltiples antenas MIMO y tener un efecto multiplicativo en el uso eficiente del canal. En la presente sección se amplía el concepto de la técnica MIMO en redes LTE.

### **2.8.1. Definición de MIMO**

Se entiende como MIMO al sistema de transmisión y recepción que usa más de una antena para enviar una señal en la misma frecuencia, a más de una antena receptora. En este esquema, se aprovecha la propagación multicamino para incrementar la eficiencia espectral del sistema de comunicación inalámbrico a través de la diversidad de antenas, distintas técnicas y complejos algoritmos de tratamiento digital de señales en ambos extremos del enlace.

El sistema MIMO se puede formular con un sistema de ecuaciones tal como:



$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{M_T} h_{i,j}(\tau, t) * s_j(t), \quad i = 1, 2, \dots, M_R, \quad (3)$$

donde:

$y_i(t)$  = Señal recibida en el extremo receptor a la salida de la  $i$ -ésima antena

$h_{i,j}(\tau, t)$  = Respuesta impulso del canal móvil en el instante  $t$  entre la  $j$ -ésima antena transmisora y la  $i$ -ésima antena receptora

$s_j(t)$  = Señal de entrada a la  $j$ -ésima antena transmisora

La ecuación (3) una formulación generalizada de estructuras SIMO (una sola antena para la emisión y MR antenas en recepción) y MISO (MT antenas en transmisión y una sola antena en recepción). Más detalles de estas dos variaciones de técnicas MIMO se describen en la Sección 2.8.5.

Después de aplicar matemática convolucional e introducir componentes de ruido y ganancia en el canal de transmisión, se puede expresar a la señal recibida en el  $i$ -ésimo receptor:

$$Y_i = \sqrt{\frac{P}{M_T}} \sigma_i S_i + N_i \quad (i = 1, \dots, r), \quad (4)$$

donde:

$Y_i$  =  $i$ -ésimo componente del vector de la señal recibida en el receptor

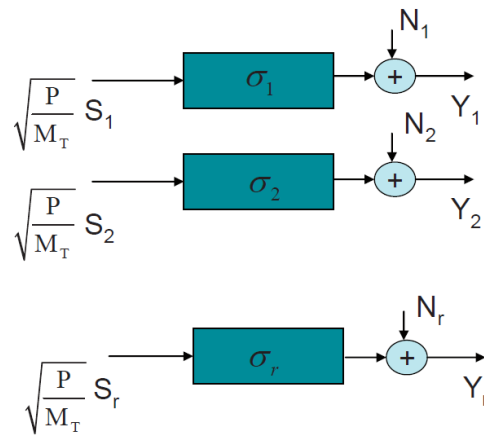
$\frac{P}{M_T}$  = Potencia de la señal transmitida en cada antena

$S_i$  =  $i$ -ésimo componente del vector de la señal a transmitir

$N_i$  =  $i$ -ésimo componente del vector del ruido del sistema

$r$  = Número de señales a transmitir

En la Figura 2.20 se aprecia el esquema MIMO para transportar las  $r$  señales a transmitir desde el extremo emisor al extremo receptor a través de  $r$  canales en paralelo desacoplados de ganancia  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$ , respectivamente.



**Figura 2.20. Esquema de una estructura MIMO**

### 2.8.2. Diversidad en el espacio

La diversidad en el espacio es la primera estructura con varias antenas ampliamente utilizada en comunicaciones móviles cuando se utilizan diferentes caminos de propagación para transmitir la señal, esto se consigue mediante diversidad de antenas, es decir, usando varias antenas transmisoras (diversidad en transmisión) y varias antenas receptoras (diversidad en recepción).

Dependiendo de la disponibilidad de las múltiples antenas en el transmisor y/o en el receptor, la técnica MIMO puede tener casos especiales tales como

SIMO (Entrada Única, Salida múltiple por sus siglas en inglés), llamado diversidad en recepción, o MISO (Entrada múltiple, Salida Única, por sus siglas en inglés), también diversidad en transmisión. Las técnicas SIMO han estado presentes durante décadas, mientras MISO es usado en la mayoría de las redes celular avanzadas; ambas técnicas buscan aumentar la relación señal a ruido (SNR) para compensar la degradación de la señal.

A lo que una señal RF se transmite, se debilita gradualmente mientras interfiere con otras señales RF reduciendo así su SNR; adicionalmente, en ambientes con alta concentración de personas, estas señales frecuentemente encuentran objetos que alteran su camino o degradan su señal. Los sistemas de múltiples antenas pueden compensar la pérdida de SNR debido a las condiciones de multicamino, combinando las señales, las mismas que presentan diferentes características de desvanecimiento; es así que los sistemas SIMO y MISO logran incrementar la ganancia SNR, combinando señales que toman múltiples caminos al transmisor y receptor de una manera constructiva. Estos sistemas presentan altas ganancias de SNR en escenarios en donde haya línea de vista, debido que diferentes antenas reciben o transmiten la misma señal; por lo tanto, se puede aumentar el SNR para incrementar el rango de la conexión o aumentar la tasa de datos usando un esquema de modulación como 16QAM o 64QAM en lugar de QPSK [28].

### **2.8.3. Técnicas de Transmisión de MIMO**

Debido a que las condiciones de la red y las capacidades del UE pueden variar de manera amplia, los sistemas MIMO deben ser altamente flexibles para poder maximizar las ganancias en SNR y eficiencia del canal. Ya que cada eNB puede configurarse diferente en términos de cómo se adapta a la transmisión en tiempo real, es importante entender los tipos o modos de transmisión disponibles en LTE así como las condiciones bajo las cuales son

más útiles. A continuación la descripción de estas técnicas: diversidad de antenas, multiplexación espacial y formación del haz.

### **Diversidad de antenas**

Consiste en el uso de múltiples antenas, ya sea en el lado de la transmisión o en el de la recepción. Si las antenas se instalan suficientemente apartadas entre sí, las señales sufren desvanecimiento de una manera independiente, creando caminos de señal diferenciados. Las diferentes configuraciones de diversidad espacial o de antenas son: SISO (Una antena transmisora y una antena receptora), MISO (Múltiples antenas transmisoras y una antena receptora), SIMO (Una antena transmisora y múltiples antenas receptoras) y MIMO (Múltiples antenas transmisoras y múltiples receptoras).

El esquema de diversidad de antenas de transmisión más popular es el STC (Codificación Espacio-Tiempo, por sus siglas en inglés), en donde el receptor tiene que conocer el canal para decodificar la señal. El STC tiene como objetivo mejorar la confiabilidad del enlace que se puede lograr transmitiendo copias redundantes y codificadas de una trama de datos, para que al menos una de ellas llegue al receptor en buen estado y reducir la probabilidad de que la señal se desvanezca por completo. Hay dos tipos de STC:

- STBC (Codificación Espacio-Tiempo en Bloques, por sus siglas en inglés), en donde la secuencia de datos a transmitir se divide en bloques de bits que se introducen juntos en un codificador; la salida es otro bloque de bits que ya contiene redundancia.
- STTC (Codificación Espacio-Tiempo de Trellis o Convolutiva, por sus siglas en inglés), en donde la secuencia de datos a transmitir es codificada con un código convolutivo de Trellis, el cual tiene la capacidad de corregir errores en el lado del receptor sin tener que retransmitir la información original, añadiendo al mensaje original bits adicionales de redundancia.

### **Multiplexación espacial**

En la multiplexación espacial, cada transmisor envía una trama diferente de datos a múltiples receptores; estas tramas de datos se reconstruyen de manera separada por el UE. Puede parecer contradictorio que dos señales enviadas al mismo tiempo y en la misma frecuencia dentro del mismo sector puedan resultar en aumento de la eficiencia del canal en lugar de la interferencia. Sin embargo, la multiplexación espacial se puede comparar con el reuso espectral convencional, donde las señales se transmiten en la misma frecuencia pero en diferentes celdas, las mismas que deben estar lo suficientemente alejadas para evitar interferencia [40].

Con la multiplexación espacial, las señales, en lugar de ocupar una celda completamente diferente, ocupan un espacio-tiempo diferente en la misma celda. Esto, gracias a que bajo buenas condiciones de multicamino se crea la ortogonalidad de la señal, la misma que hace que una simple celda sea en verdad múltiples celdas con respecto a la cantidad de datos que pueden ser enviados en una banda de frecuencia particular. Adicional a las buenas condiciones de multicamino, la multiplexación espacial depende de altos valores de SNR para distribuirlo entre todas las múltiples tramas de datos, cada uno con un cierto nivel de potencia y lograr altas ganancias de eficiencia de canal.

### **Formación del haz**

La idea de la formación del haz (beamforming), es usar múltiples antenas para controlar la dirección del patrón del haz ponderando adecuadamente la fase y la magnitud de cada señal de antena (formación del haz de transmisión), el cual provee mejor cobertura a usuarios específicos. Esto se consigue porque cada antena individual en el arreglo aporta una contribución a la señal direccionada, alcanzando un arreglo de ganancias llamado ganancias de formación del haz. El uso de la formación del haz en el lado del

receptor hace posible determinar la dirección desde la que llega la señal, denominado también DoA (dirección de llegada, por sus siglas en inglés), lo que puede ser utilizado para eliminar señales interferentes seleccionadas escogiendo un patrón de haz nulo en la dirección de la señal no deseada [28].

La técnica de formación de haz trata de proveer la mejor señal posible al usuario en una ubicación específica. Hay dos métodos básicos para encontrar el vector de peso que se pueden usar, los mismos que también afectan la distribución del arreglo de antenas:

- Pre-codificación rango-1 de lazo cerrado. Este modo equivale a la formación del haz ya que solo se transmite una sola capa explotando la ganancia del arreglo de antenas. Sin embargo, también se puede ver como un caso especial de multiplexación espacial SU-MIMO (MIMO de un usuario, por sus siglas en inglés). En este modo, el UE alimenta la información del estado del canal de vuelta hacia el eNB para indicar la pre-codificación adecuada y aplicar la operación de formación del haz.
- Formación del haz con señales de referencia de UE específicas. En este caso, la pre-codificación MIMO no está restringida a una codificación predefinida, por lo que el UE no puede usar la señal de referencia específica para la celda para la demodulación.

Cabe anotar que la técnica de formación de haz en LTE se puede aplicar al canal PDSCH y no a otros canales de control de enlace descendente.

#### **2.8.4. Funcionamiento de MIMO**

Entre un transmisor situado en un punto A y un receptor ubicado en un punto B hay un camino principal, considerado como el más directo entre ambos. Inevitablemente no todas las señales que se transmiten entre estos puntos siguen este camino, sino que debido a numerosas reflexiones y/o

refracciones que sufren debido a los obstáculos que se encuentran a su paso, como montañas, edificios, el terreno o incluso las mismas capas de la atmósfera, toman múltiples caminos distintos para alcanzar al receptor. A esto se le llama propagación multicamino.

Las señales que recorren estos múltiples caminos llegan al receptor en tiempos diferentes, debido a que cada una de éstas sigue una ruta diferente al resto, por lo que hay un desfase con respecto a la señal principal. Según este desfase se produce interferencias constructivas o destructivas provocando sumas o degradaciones de la señal original. La señal vista por el receptor, que no es más que una combinación lineal de las señales multicamino con la señal principal, sufre interferencias constructivas o destructivas que se traducen en sumas o degradaciones de la señal final.

Adicional a lo anterior, hay que añadir otro tipo de distorsiones características del canal inalámbrico:

- Interferencia inter-simbólica (ISI), causada por la propagación multicamino.
- Desvanecimiento de la amplitud de la señal (fading), también causada por la propagación multicamino y los efectos de dispersión que sufre la señal.
- Interferencia co-canal, causada cuando dos estaciones emiten a la misma frecuencia, en el mismo canal.
- Efecto Doppler en el canal, cuando las estaciones transmisoras y/o receptoras se encuentran en movimiento.
- Ruido término, inherente a los propios dispositivos electrónicos.

Todas estas distorsiones causan una reducción importante de la velocidad de transmisión de datos y un incremento del número de errores, traduciéndose en ruido, desvanecimiento de la amplitud, recepción intermitente o repentinas caídas de la transmisión durante la comunicación.

La idea con la que fue concebida MIMO fue para el aprovechamiento de la propagación multicamino para multiplicar así la capacidad de los sistemas inalámbricos. Cada ruta multicamino se la trata como un canal diferente, creando así una especie de canal virtual sobre el cual se transmite la señal. Al emplear múltiples antenas separadas espacialmente, se puede aprovechar estos canales virtuales para transmitir más datos, multiplicando de esta manera la eficiencia de canal. La tasa máxima por canal crece linealmente con el número de flujo de datos diferentes que son transmitidos en el mismo canal; además, debido a la diversidad de antenas, se incrementa también la distancia de cobertura.

Con un esquema de transmisión MIMO se consigue un incremento lineal en la eficiencia espectral frente al incremento logarítmico que consiguen otros sistemas tradicionales de una sola antena. Por consiguiente, la cobertura (en términos de distancia), la calidad (en términos de la tasa de error de bits, BER), la capacidad (referida en Bits/Hz/s o Número de usuarios/Hz) y la tasa de bits (Bits/s) se verán mejoradas notablemente.

#### **2.8.5. MIMO en LTE**

Como ya se describió en la sección 0, MIMO puede trabajar como una combinación de técnicas SIMO y MISO, alcanzando mayores ganancias de SNR y por consiguiente ampliando la cobertura y la velocidad de los datos. Sin embargo, cuando el SNR es alto, las ganancias adicionales en la eficiencia del canal (throughput) son mínimas, por lo que el beneficio de mayores SNRs no se justifican para la cantidad de recursos utilizados. Para alcanzar también ganancias en la eficiencia del canal donde ya hay SNR con ganancias altas, LTE usa la técnica MIMO llamada multiplexación espacial.

En LTE, cada conjunto de datos enviados a través de las antenas en una operación de multiplexación espacial se llama capa. Bajo condiciones ideales, cada capa de una transmisión de multiplexación espacial contiene



tantos datos como una transmisión LTE de un único transmisor. El resultado es que la multiplexación espacial puede multiplicar teóricamente la eficiencia de canal por el rango de la transmisión. Este efecto multiplicativo en la eficiencia del canal significa que la tecnología MIMO es esencial para alcanzar todos los beneficios de LTE [40] .

Mientras que el enlace de antenas múltiple punto a punto entre una estación base y un UE es referido como SU-MIMO, mientras que MU-MIMO es cuando varios UEs se comunican de manera simultánea con una estación base en común usando los mismos recursos en dominio del tiempo y la frecuencia.

### **SU-MIMO**

SU-MIMO (MIMO de usuario único, por sus siglas en inglés) consigue mejoras en la eficiencia espectral, la capacidad del canal y la confiabilidad, esencialmente mediante el uso de técnicas como la multiplexación espacial o STC. Pero SU-MIMO no explota la diversidad de usuarios ni el acceso múltiple ya que los grados de libertad adquiridos con el uso de múltiples antenas son aprovechados para crear una transmisión multidimensional punto a punto, pero no punto a multipunto. Es decir, SU-MIMO no está diseñado para trabajar con varios usuarios al mismo tiempo; característica diferencial con MU-MIMO.

### **MU-MIMO**

MU-MIMO (MIMO de Múltiples Usuarios, por sus siglas en inglés) es radicalmente diferente a SU-MIMO y representa un conjunto de técnicas y algoritmos avanzados que, además de aprovechar las ventajas del uso de múltiples antenas, explota la multiplicidad de usuarios. Esta variación de MIMO implica el acceso múltiple, es decir, el reparto espacial del canal entre múltiples usuarios, pudiendo crear transmisiones multidimensionales punto a multipunto, o incluso multipunto a multipunto, y es base para en la implementación del Release 10 de LTE conocido como LTE Avanzado.

## **2.9. Agregación de portadora (CA)**

La agregación de portadora es una técnica que permite incrementar el ancho de banda de transmisión total hasta 100 MHz y actualmente es aplicado para la siguiente versión de LTE, LTE Avanzado.

La velocidad de los datos, en el orden de 1 Gb/s, puede que teóricamente sea alcanzada usando anchos de banda contiguos de 40 MHz o más. Sin embargo, es irreal alcanzar estos anchos de banda contiguos debido a la competencia que hay por el uso del espectro y la fragmentación de éste. Es por esto que, LTE Avanzado hace uso de la agregación de portadora para soportar estos anchos de banda alargados. Esto tiene también la ventaja de limitar el costo del equipo y habilita bastante de la tecnología ya desarrollada en el Release 8 para que sea reutilizada. Cada componente de portadora (CC) dentro de una agregación está diseñada para ser fundamentalmente similar a una portadora de LTE Release 8, de modo que se puedan configurar de una manera compatible y puedan usarse por los UEs heredados de esta tecnología si se desea.

En Agregación de Portadora (CA), los CC no necesitan ser contiguos, de esta forma el operador con espectro fragmentado puede suministrar servicios de alta velocidad usando porciones de las distintas bandas del espectro que posee; tampoco necesita pertenecer a la misma banda o tener el mismo ancho de banda.

## **2.10. Limitaciones de LTE**

Al haber completado el LTE Release 8, la Organización 3GPP empezó a buscar las formas para una futura evolución de LTE, con el objetivo de aprovechar la tecnología LTE existente y asegurar que esta tecnología siga siendo el estándar global líder para la banda ancha móvil. El rendimiento mejorado, en principio, se puede alcanzar de dos maneras: usando más espectro de radio y usando el espectro disponible más eficientemente; dos de las limitaciones actuales más importantes de LTE Release 8 y 9.

La UIT ha tomado medidas para garantizar que más espectro de radio esté disponible, a nivel mundial siempre que sea posible, para sistemas más allá de la tercera generación. La Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2007 [41] dio lugar a nuevas bandas de espectro destinados a servicios móviles, con el fin de satisfacer las necesidades percibidas y asegurar el uso efectivo de las asignaciones de espectro realizadas. En marzo de 2008 la UIT-R emitió una carta circular [42] llamando a la presentación de candidatos de tecnologías de interfaz de radio, siendo las propuestas seleccionadas parte de los requerimientos de ITU-R para LTE-A.

A pesar de que LTE tiene pocos años de servicio en Latinoamérica, las necesidades por mayor capacidad de las redes siempre es una constante, en especial para los años venideros. En este escenario, la tecnología LTE tiene un rol protagónico ya que fue concebida para transmitir datos, y le da no solo una capacidad muy superior a la de las tecnologías previas sino también la flexibilidad necesaria para poder evolucionar en distintas direcciones y dar así respuesta a las demandas futuras. Tal como su nombre lo indica en inglés, LTE fue pensada para una evolución de largo plazo. Dicho de otra manera, provee los cimientos para un desarrollo que ofrece capacidades muy superiores a las actuales y por este motivo, desde una perspectiva tecnológica, LTE marca un punto de inflexión respecto de lo previo.

Para poder afrontar el previsible crecimiento del tráfico de datos, la tecnología LTE evoluciona, optimizando los recursos existentes y desarrollando nuevas formas de dar servicios. Con toda la región ya embarcada en LTE, el próximo paso es la implementación de LTE Avanzada, que no solo cuenta con mayores velocidades y capacidades, sino que habilita la integración de nuevas y mejores tecnologías.

## **CAPÍTULO 3**

### **3. MODELAMIENTO DE UNA RED LTE EN LA HERRAMIENTA ATOLL**

ATOLL es un programa para planificación y optimización radio que permite a los operadores de comunicaciones móviles realizar el diseño y planificación de sus redes y a su vez analizar su comportamiento y funcionamiento; razón por la cual se estudia el funcionamiento y se pone en práctica a través de la manipulación de los diversos parámetros que se requieren para implementar de manera adecuada a través de una simulación en la herramienta en mención.

Es importante mencionar que dentro del presente trabajo no se amplía la etapa de transmisión dentro del estándar debido a que no corresponde a un factor prioritario en el modelamiento.

#### **3.1. Elementos de planeación de una red**

La planeación de una red celular es un proceso complejo que consiste de varias fases y cuyo objetivo final es el de definir el diseño de esta red. La dificultad en la planeación de la red celular está en combinar todos los requerimientos de una manera óptima e implementar una red eficientemente desde el punto de vista de los costos incurridos. [43].

Antes de la planeación en sí debe recurrirse al análisis de la situación del mercado, el cual abarca a los competidores e información relevante a la participación del mercado, cobertura, servicios y tarifas. En base a este análisis de situación, es

posible crear a futuro estrategias que le permitirán al nuevo operador desarrollar sus servicios de acuerdo a la demanda y expectativas de los subscriptores y de la capacidad que pueda llegar a tener la nueva red que se calcula en función de su uso estimado.

El requerimiento básico de la red celular es alcanzar valores óptimos de cobertura y calidad, aunque también se puede decir que el requerimiento está relacionado a lo satisfecho que pueda estar el usuario en la red celular. Cobertura implica que la red celular cubra el área geográfica donde se encuentra el usuario o que la señal sea lo suficientemente potente como para alcanzar diferentes tipos de área. Por otro lado, la calidad está relacionada a factores como llamada exitosa o tasa de caída de llamada, los mismos que no deben exceder valores acordados con el ente regulador.

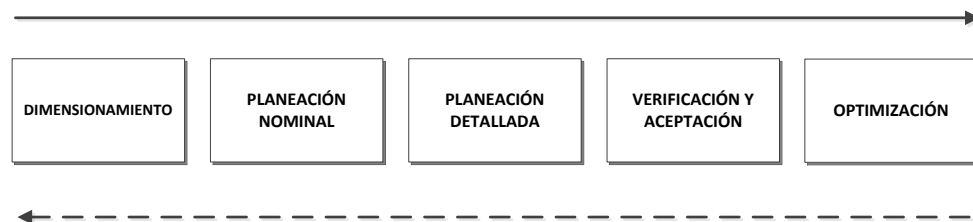
Los factores ambientales también afectan la planeación de la red: la propagación de las ondas de radio dependen de la morfología del área, la atenuación varía, dependiendo de si la propagación se da en áreas rurales, suburbanas o urbanas o de si son dentro de una casa o edificio. La topografía del área planeada, la ubicación de las ciudades, los caminos y los puntos de conexión son factores que inciden al momento de la planeación [43].

Debido a que al inicio del proceso de planeación de una red, hay varios parámetros de diseño que requieren optimización y compromiso para finalizar en una red celular funcional. Como ya se mencionó anteriormente, el objetivo de la planeación es construir una red con la calidad más alta posible y eficiente en costos. Estos dos factores están conectados a la ganancia ya que cuanto mejor se pueda servir a los usuarios y cuanto más tráfico pueda manejar la red, mayor es el impacto en las ganancias del operador. Esto explica la complejidad de la planeación de redes, donde se necesita ofrecer la suficiente cobertura y capacidad de red celular con la mínima inversión posible.

Los entregables de la planeación de la red de radio son las configuraciones finales de la estación base y la ubicación del sitio, además se entregan las predicciones finales de coberturas incluyendo los mapas digitales, la proyección del consumo de potencia calculado para todas las configuraciones, el plan de frecuencia y el análisis de interferencias.

### 3.1.1. Especificación inicial de la red

El proceso de planeación de la red se divide en cinco principales pasos, donde los cuatro primeros pasos se ejecutan antes del lanzamiento de la red, siendo el último paso cuando la red está en operación. En la Figura 3.1 se resumen los pasos principales involucrados en la planeación de la red:



**Figura 3.1. Pasos en la planeación de redes**

#### **Dimensionamiento o pre-planeación**

Como en todo negocio, es importante estar preparado a las situaciones del mercado y la competencia, y como se mencionó en la sección anterior, los requerimientos de la planeación de la red dependen de factores como la cobertura y la calidad. Además, también existen limitaciones en la planeación, como el rango de frecuencia restringido y el presupuesto para la inversión y, debido al hecho de que la planeación de la red no se puede optimizar utilizando todos los parámetros, es necesario priorizarlos en función de las necesidades del cliente a través de todo el proceso. Estos criterios en

la planeación de la red se usan como entrada en el proceso de dimensionamiento. A continuación se listan las entradas básicas [43]:

- Requerimientos de cobertura, nivel de señal para exteriores, interiores y probabilidades de cobertura
- Requerimientos de calidad, tasas de caída de llamada y bloqueo
- Espectro de frecuencia, número de canales incluyendo información acerca de posibles necesidades de bandas de guarda
- Información del subscriptor, número de usuarios y gráficos de crecimiento
- Tráfico por usuario
- Servicios

El dimensionamiento entrega un plan preliminar de la red, el cual incluye el número de elementos de red que van a necesitarse para cumplir con la calidad de los servicios requeridos por el operador. El resultado del dimensionamiento es indicar el número mínimo de estaciones base en función de la cobertura y la capacidad de la red; adicionalmente es importante considerar las proyecciones en el crecimiento de los subscriptores y de los servicios que van a ser desarrollados en el futuro.

### **Planeación nominal**

En esta fase se planifica la cobertura de la red de radio y la capacidad con una herramienta de planeación. La planeación nominal no da certeza sobre la ubicación del lugar pero da una idea inicial acerca de la ubicación y también las distancias entre los sitios y corresponde al punto de partida para las visitas técnicas que permitan encontrar la ubicación real del sitio. En esta fase es importante que haya acuerdo en la ubicación del sitio tomando en consideración los criterios de radio frecuencia, el tipo de transmisión y sobre los temas legales y contractuales de la adquisición del sitio.

Las herramientas de planeación para estimar la cobertura incluyen el uso de mapas digitales con información de la topografía y la morfología del lugar así como el modelo ajustado para la propagación. En cuanto a la planeación de la capacidad, se acuerda con el cliente las condiciones de funcionamiento en la celda y en sus límites, como por ejemplo el número de estaciones transmisores por estación base.

Los entregables de esta fase son los planes finales de cobertura y capacidad, además de los mapas de cobertura realizados para el área planeada, la ubicación final del sitio y su configuración.

### **Planeación detallada**

Una vez que la fase de planeación nominal ha terminado y se conocen la ubicación del sitio y su configuración, se da paso a la planeación al detalle, cuyos entregables son la planeación de frecuencia, adyacencias y parámetros.

Las herramientas utilizadas en esa fase tienen algoritmos de planeación de frecuencia; esto requiere la configuración de parámetros y su priorización para que se puedan ejecutar las iteraciones. La herramienta también utiliza algoritmos de interferencia y la idea principal es minimizar la interferencia co-canal y encontrar la interferencia de adyacencias más baja posible. La planeación de frecuencia es crítica dentro de la planeación de la red; el número de frecuencias que se pueden usar es siempre limitado y por tanto la tarea consiste en encontrar la mejor solución posible.

### **Verificación y aceptación**

Después de las etapas de planeación y posterior instalación, la fase de verificación permite volver a revisar parámetros previamente configurados para asegurar que estos estén correctamente ajustados y, en el caso de que no lo estén, corregirlos previo a la aceptación y posterior encendido



comercial. Con esto, se asegura el correcto funcionamiento de la red durante la operación del sistema.

### **Optimización**

Una vez que la red se ha puesto en operación, las actividades relacionadas a la planeación y a la optimización no terminan debido a que la optimización es un proceso continuo durante la implantación de una red. Es así, que para la optimización la entrada requerida es toda la información disponible acerca de la red y su estado. Las estadísticas de la red, alarmas y el tráfico en sí se monitorizan cuidadosamente; además las quejas del cliente también son una fuente de información para el equipo de optimización. Este proceso incluye mediciones a nivel de red y mediciones de campo de tal manera que se pueda analizar e indicar los potenciales problemas.

El objetivo del diseño y planeación de una red celular, es siempre obtener una implementación eficiente, donde no se presenten problemas de sub-dimensionamiento debido a la poca cantidad de sitios desplegados y que pueden producir bajos niveles de cobertura y tasas bajas de servicio; o sobre-dimensionamiento con demasiados sitios desplegados que pueden producir interferencias y altos costos durante la fase del despliegue.

En las siguientes secciones se procede a describir de manera específica las herramientas y técnicas a utilizar para la correcta planeación de una red celular LTE.

#### **3.1.2. Mapas Digitales**

Dentro de una herramienta RPN (Planificación de la Red de Radio, por sus siglas en inglés) el requisito más básico e importante para la planeación de cualquier red inalámbrica es el mapa geográfico de la zona de implementación. El mapa geográfico es necesario en las predicciones de

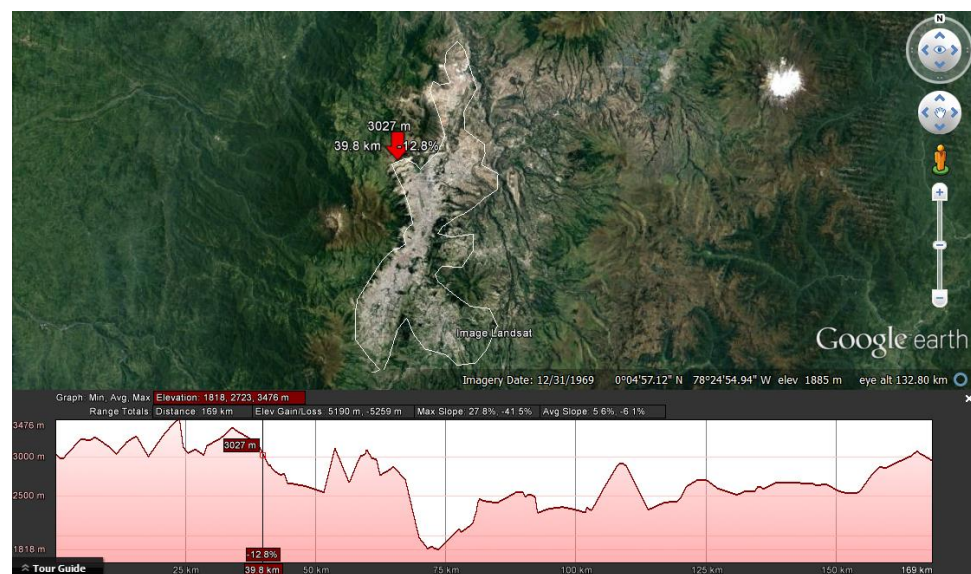
cobertura para calcular las pérdidas del enlace radio para posteriormente utilizar esta información para el cálculo de parámetros y su análisis [43].

Un mapa digital debe incluir datos topográficos, morfológicos, además de la información de la ubicación y altura de las edificaciones. Es importante incluir datos vectorizados para la construcción de lugares en los mapas digitales. Si se dispone de información vial, también se puede usar en las predicciones de cobertura y modelamiento del tráfico. Las unidades de los vectores, definen la resolución de los mapas digitales, cuyos valores se encuentran en los rangos de 1 hasta 200 metros. Entre más fina sea la resolución de un mapa digital, se obtendrán resultados más precisos del comportamiento de la red.

A continuación, se detallan los parámetros a ser considerados en la elaboración de mapas digitales durante el proceso de planeación:

- DTM (Modelo Digital del Terreno, por sus siglas en inglés): presenta el relieve de la zona, donde se configuran el modelo de propagación para los cálculos de reflexión, difracción y desvanecimiento a causa del medio ambiente.
- Clases de Clutter: Muestra en el mapa digital los diferentes tipos de terreno que se encuentran en el área como las zonas rurales, urbanas, densa urbanas, aeropuertos, lagunas, bosques, edificaciones, etc.
- Altura de Clutter: Ofrece la información de altura de los diferentes elementos que se encuentran dentro de las clases de clutter.
- Información de Vector: Muestra objetos lineales como información vial, ubicación de aeropuertos o vías de ferrocarril.
- Resolución: Se puede configurar para obtener resultados precisos al momento de planear la red y depende de la capacidad de procesamiento del computador.

Para el presente trabajo, se seleccionó como locación la ciudad de Quito, la misma que tiene una morfología variada, entre montañosa y plana, además de que su población está asentada en zonas urbanas, densa urbanas y rurales con un alto número de habitantes y factores climatológicos que hacen de la ciudad de Quito el escenario ideal para estudiar y caracterizar la propagación de señales en sistemas de comunicaciones inalámbricos. En la Figura 3.2 se muestra la característica del relieve de la locación de estudio.



**Figura 3.2. Relieve del perímetro de la ciudad de Quito**

### 3.1.3. Modelos de propagación

Con los modelos de propagación se puede predecir la pérdida en la trayectoria que una señal inalámbrica entre dos puntos. Una de las ventajas de obtener una predicción de señales electromagnéticas considerando su trayectoria entre el transmisor y el receptor, es poder determinar la factibilidad de proyectos que se desean implementar en determinadas áreas, de esta manera se logra realizar una estimación de costos, requerimientos de

equipos, y demás parámetros necesarios para el despliegue de una determinada tecnología.

El diseñar, analizar e implementar sistemas de comunicaciones requiere una utilización eficiente de los recursos disponibles para efectivamente transferir la información entre las partes involucradas. Sin embargo, en la práctica se tolera cierto grado de incertidumbre debido a los ambientes de propagación inciertos que hay en cada sistema de comunicación y por eso se estudian diferentes algoritmos de procesamiento de señal, diseños de transmisores y receptores para así alcanzar el mejor desempeño utilizando los recursos disponibles [44].

Un modelamiento real de las características de propagación es esencial por dos principales razones en referencia a los sistemas LTE: los modelos del canal de radio y el modelo utilizado para la propagación, los mismos que deben ser los más realistas posibles para que la fase de planeación del despliegue de la red LTE sea exitosa. Se debe considerar diferentes ambientes como el rural, el urbano o el denso urbano y fijar diferentes requerimientos como la configuración de antenas y el modo de transmisión espacial. Para analizar LTE, se cubren numerosos casos especiales desde el análisis de sectores rurales montañosos hasta los densos urbanos [28].

Las características de propagación están afectadas en gran parte por la frecuencia de la portadora. En la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones de noviembre de 2007 [41] se establecieron nuevas bandas de frecuencia para los sistemas IMT entre 450 MHz y 3.6 GHz. Además, dependiendo de la frecuencia de portadora desarrollada, las características del canal de radio variarán significativamente incluso en un tipo de ambiente particular de propagación.

Como ya se describió en la sección 2.8, una característica importante de LTE es el uso variado de diferentes técnicas MIMO en donde se toma ventaja del desvanecimiento de multicamino para incrementar la capacidad y por lo tanto, es importante crear modelos realistas del canal de radio MIMO para evaluar el desempeño de LTE y sus futuras mejoras.

La veracidad de un modelo u otro se mide por la fiabilidad de los resultados en contraste con mediciones realizadas en campo. Para mejorar la eficiencia en el cálculo, los modelos de propagación tienen que estar calibrados con el tipo de terreno específico, frecuencia, distancias, alturas. La Tabla 3.1 describe los modelos de propagación que son más utilizados en el modelamiento de sistemas inalámbricos actuales.

<b>Modelo</b>	<b>Frecuencia MHZ</b>	<b>Uso recomendado</b>
COST-231 Hata	800—2000	$0.02 < d < 5$ km, UMTS, GSM1800, LTE
Erceg-Greenstein	1900—6000	$0.1 < d < 8$ km, WiMAX Fijo
IMT-2000	800-2800	Interior de oficina, vehículo, exterior a interior
ITU-526	30—1000	Receptores fijos
ITU-529	300-1500	$1 < d < 100$ km, GSM900, CDMA2000, LTE
Okumura-Hata	150—2200	$1 < d < 20$ km, GSM900, CDMA2000, LTE
WLL	30—10000	Receptores fijos, enlaces de microondas, WiMAX

**Tabla 3.1. Modelos de propagación comúnmente usados**

De acuerdo al detalle de la Tabla 3.1, se pueden clasificar a los modelos de propagación de acuerdo a su aplicación en:

- Modelos de propagación exteriores

- Modelos de propagación interiores

Estos tipos de modelos de propagación implican diferentes factores: en ambientes exteriores se debe considerar el relieve, los obstáculos en la trayectoria de propagación como las edificaciones o los bosques, además que las señales electromagnéticas se desvanecen a diferentes velocidades, en diferentes entornos; mientras que en los ambientes interiores, se debe considerar una baja potencia de transmisión, distancias cortas de propagación y pérdidas por elementos de construcción como el cemento o el metal.

Para el presente trabajo de investigación se eligió el modelo de propagación SPM (Modelo de Propagación Estándar, por sus siglas en inglés), que es un modelo deducido a partir del modelo de OKUMURA HATA, utilizado especialmente para realizar cálculos de predicciones entre los rangos de 150 MHz – 3500 MHz y coberturas largas de distancia (entre 1km – 20 km).

El modelo de propagación estándar SPM está basado en la siguiente formula:

$$L_{\text{model}} = K_1 + K_2 \log d + K_3 \log H_{T_{\text{xeff}}} + K_4 \times \text{Pérdida de difracción} + K_5 \log d \times \log H_{T_{\text{xeff}}} + K_6 (H_{T_{\text{xeff}}}) + K_7 \log H_{T_{\text{xeff}}} + K_{\text{clutter}} F(\text{clutter}), \quad (5)$$

donde:

$K_1$  : Constante offset

$K_2$  : Factor multiplicador de Log (d)

d : Distancia entre el transmisor y receptor

$K_3$  : Factor multiplicador de  $H_{T_{\text{xeff}}}$

$H_{T_{\text{xeff}}}$  : Altura efectiva de la antena de transmisión

$K_4$  : Factor multiplicador para el cálculo de la difracción (número positivo)

$K_5$	: Factor multiplicador de $\log d \times \log H_{T_{\text{xeff}}}$
$K_6$	: Factor multiplicador de $H_{T_{\text{xeff}}}$
$K_7$	: Factor multiplicador de $\log H_{T_{\text{xeff}}}$
$H_{T_{\text{xeff}}}$	: Altura efectiva de la antena de móvil
$K_{\text{clutter}}$	: Factor multiplicador de $f(\text{clutter})$
$F(\text{clutter})$	: Factor promedio ponderado de las pérdidas por la clase de zonas

$K_1$  y  $K_2$  son constantes que caracterizan al modelo de propagación. Existen 4 valores para  $K_1$  y  $K_2$ , que dependen de la distancia entre el transmisor y el receptor y de la existencia de línea de vista entre ellos. Para el presente trabajo  $K_6 = K_7 = K_{\text{clutter}} = 0$ , ya que no se considera altura de antenas del UE, ni el promedio ponderado de pérdidas debido a las clases de zonas.

### 3.2. Implementación de una red LTE en ATOLL

ATOLL es un software de nivel profesional, desarrollada por la empresa Forsk, para el diseño y optimización de redes inalámbricas, lo que la convierte en una herramienta valiosa y rentable para los operadores de telefonía móvil; esto debido a que brinda una noción del comportamiento de la red inalámbrica desde la etapa de planificación hasta su correspondiente despliegue, permitiendo así estudiar su desempeño y realizar los respectivos ajustes de optimización [9].

A partir del 2008, la empresa Forsk agrega un módulo LTE a la versión 3.1.0 de su software ATOLL, el cual permite realizar una simulación bastante precisa de la arquitectura E-UTRAN, que hace referencia a una red LTE. En el presente trabajo se utiliza la versión 3.2.1, la misma que permite realizar simulación de diferentes tecnologías inalámbricas incluyendo UMTS, LTE, IMAX, entre otras, convirtiéndola en una herramienta bastante versátil y útil para los operadores o proveedores de sistemas de telecomunicaciones inalámbricos.

### 3.2.1. Creación de un Proyecto

Para crear un proyecto en ATOLL, independientemente de la tecnología que se vaya a utilizar, hay dos métodos disponibles:

#### **Basado en plantillas**

El primer método consiste en generar un proyecto partiendo de plantillas pre-cargadas en el software y que poseen parámetros específicos dependiendo de la tecnología que se haya seleccionado previamente. ATOLL permite crear plantillas propias partiendo de documentos ya existentes donde se han realizados ajustes personalizados, como por ejemplo los patrones de radiación de las antenas o los modelos geográficos. En la Figura A.1 del anexo se resumen los pasos a seguir para crear el proyecto de la manera anteriormente indicada.

#### **Basado en datos**

El segundo método consta de la creación de un proyecto a partir de una base de datos que puede haberse creado previamente en las herramientas: MS Access, SQL u Oracle. Este método brinda la facilidad de poder conectar varias bases de datos y poder compartir simultáneamente la información de la red de telecomunicaciones en tiempo real entre varios usuarios. En la Figura A.2 del anexo se resumen los pasos a seguir para crear el proyecto de la manera indicada.

Para el presente estudio se va a crear el proyecto en base a la plantilla LTE disponible en la herramienta y que servirá de base referencial para ajustar los parámetros en función de los requerimientos planteados.

### 3.2.2. Importación de Mapas Digitales

Existen varios tipos de datos geográficos que se pueden utilizar dentro de un proyecto de ATOLL. La agregación de datos geográficos permitirá contar con



simulaciones más exactas dependiendo del tipo de datos que se importen y fines de estudio. A continuación se detallan los diversos tipos de datos y su influencia en los cálculos dentro de la herramienta [9]:

Datos geográficos usados en cálculos de propagación:

- Modelo de terreno digital
- Clases de clutter
- Altura de clutter

Datos geográficos usados en el dimensionamiento:

- Mapas de tráfico

Datos geográficos usados en estadísticas:

- Mapas de población
- Mapas personalizados

Datos geográficos usados para fines de observación

- Mapas escaneados
- Imágenes WMS (Servicio de imágenes Web, por sus sigla en inglés)
- Contornos, líneas, puntos de representación como carreteras, vías de acceso y división de regiones

El mecanismo de importación de los datos se muestra en la Figura A.3 del anexo. Debido a la naturaleza del presente trabajo de investigación, en donde el objetivo es analizar el comportamiento de la red LTE en escenarios de alto tráfico, se van a utilizar los tipos de datos geográficos para realizar cálculos de propagación y dimensionamiento, los mismos que permitirán caracterizar los ambientes en los cuales funciona la red.

### 3.2.3. Creación de una celda celular

Previo a la creación de las estaciones base (eNB), con sus respectivos transmisores se debe seleccionar la banda de operación en la que la red LTE va a trabajar. Con fines prácticos, se ha decidido trabajar dentro de las bandas de operación que se muestran en la Tabla 3.2, y que actualmente son las que se encuentran asignadas a los operadores.

Banda E-UTRA	$f$ (MHz)	Enlace ascendente BS recibido UE transmitido (MHz)	Enlace descendente BS transmitido UE recibido (MHz)	Duplex Espaciado (MHz)	Anchos de banda de canal (MHz)
4	1700	1710 – 1755	2110 – 2155	400	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
28	700	758 – 803	55	3, 5, 10, 15, 20	

**Tabla 3.2. Bandas de frecuencia LTE en Ecuador**

La asignación de las bandas de frecuencia de operación por parte de los operadores de telefonía móvil, se basa en diferentes procesos de adjudicación, como por ejemplo, una subasta del espectro radioeléctrico disponible. Las bandas de operación quedan a libre elección del país, pero éstas deben estar dentro de las recomendaciones que se realizan en el estándar LTE.

Debido a los factores previamente mencionados, se tiene planificado trabajar en las bandas de operación que se muestran en la Tabla 3.3 con la finalidad de cumplir con los dos requisitos previamente mencionados: bandas de operación del país y que se encuentren dentro del estándar LTE.

Banda	Nombre (MHz)	Enlace descendente (MHz)		Ancho de banda (MHz)	Enlace ascendente (MHz)	
		Baja	Alta		--	Baja
7	1700	2110	2155	20	1710	1755
28	700	758	803	20	703	748

**Tabla 3.3. Distribución de frecuencias de las bandas de operación**

Se escoge la técnica de duplexación por división de frecuencia FDD debido a que esta técnica utiliza partes separadas del espectro para el enlace ascendente y descendente, brindando una mayor eficiencia espectral en comparación con la duplexación por división de tiempo TDD. En la en Tabla 3.3 se muestra la distribución de frecuencias de esta técnica. Una vez que se establece la zona geográfica donde se va a realizar el análisis y las bandas de frecuencia en las que va a operar la red, se procede de manera inmediata a la planificación y ubicación de eNBs que brindarán los respectivos servicios de comunicación.

ATOLL permite definir un eNB mediante emplazamientos, transmisores y celdas. Dichos parámetros permiten a la herramienta calcular la pérdida de los enlaces ascendentes y descendentes y el factor de ruido del transmisor en diferentes tecnologías incluyendo LTE.

Un emplazamiento establece un punto geográfico, definido por el sistema de geo-referencia, en donde estarán ubicados físicamente los eNBs. El transmisor establece las características de los equipos de transmisión y recepción a implementarse como antenas, cables, alimentadores o acopladores, y una celda define las características de los canales de radio que dependen de la tecnología que va a utilizar la red.

Para la asignación de los emplazamientos de una estación base, se parte de la información del sistema de telecomunicaciones existente. Dicha información se complementa con la incorporación de mayor número de eNBs con el cuidado de evitar traslapes en cobertura, y aplicar criterios de reducción de interferencia y reúso de frecuencias. Dentro del presente estudio, se tienen las siguientes consideraciones para la asignación de los emplazamientos:

- Un emplazamiento por eNB
- Tres transmisores por eNB
- Una celda por transmisor

Para realizar la creación de los eNBs se debe generar una plantilla, la cual debe contener la información que se presenta en la tabla Tabla 3.4:

	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>General</b>	Sectores	3
	Radio hexagonal	120
	Azimut del primer sector	0
	Altura respecto al suelo	30
	Tilt mecánico	0
	Tilt eléctrico adicional	0
	Modelo de la antena	65deg 18dBi 4Tilt 2100MHz
	Número de puertos de la antena Tx	1
	Número de puertos de la antena Rx	1
	Modelo de propagación	Modelo por defecto
	Radio	3500

	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
	Resolución	20 m
<b>Transmisor</b>	TMA	Default TMA Equipment
	Feeder	1/2" at 2100 MHz
	Equipo de Tx	Equipo eNode-B por defecto
	Distancia feeder Tx	5m
	Distancia feeder Rx	5m
	Miscelánea de pérdidas Tx	0 dB
	Miscelánea de pérdidas Rx	0 dB
	Total de pérdidas Tx	1.51 dB
	Total de pérdidas Rx	-2.09 dB
	Figura de ruido	4dB
<b>LTE</b>	Potencia máxima	40 dBm
	SS, PBCH, PDCCH, PDSCH offsets	0 dB
	Banda de frecuencia	AWS FDD - 20 MHz (E-UTRA Band 4)
	Equipo de recepción	Equipo de celda por defecto
	Programador ( <i>Scheduler</i> )	<i>Proportional Fair</i>
	RSRP mínimo	-140dBm
	Carga de Trafico enlace descendente	100%
	Máxima carga tráfico enlace descendente	100%

	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
	Carga de tráfico enlace ascendente	100%
	Máxima carga tráfico enlace ascendente	100%
	Aumento del ruido enlace ascendente	6dB
<b>Vecindades</b>	Máximo número de vecindades (dentro de la tecnología E-UTRAN)	32
	Máximo número de vecindades (fuera de la tecnología E-UTRAN)	32

**Tabla 3.4. Parámetros de configuración de transmisores y celdas**

Los pasos para generar la plantilla se ilustran en la Figura A.4 del anexo en donde la secuencia de pasos es la siguiente: *Menú de navegación izquierdo* → *Parameters* → *Radio Network Settings* → *Station Template* para que luego aparezca un cuadro de diálogo y poder configurar los parámetros en las viñetas General, *Transmitter* y LTE según la información que se describe en la Tabla 3.4.

### 3.2.4. Predicciones de Cobertura

ATOLL permite obtener dos tipos de predicciones:

- Predicciones a través del análisis de puntos, en donde se pueden predecir los niveles de señal emitidos por los transmisores que se encuentran alrededor de un punto de referencia, así como también puede predecir la calidad de la señal y los niveles de interferencia en este punto específico. Este tipo de predicciones está disponible de manera independiente de la tecnología que se esté trabajando.
- Predicciones de cobertura, que permite determinar los niveles de cobertura emitidos por un transmisor, la cobertura y calidad de la señal,

zonas de solapamiento, disponibilidad de servicio, niveles de interferencia entre otros factores dependiendo de la tecnología que se esté utilizando.

Dentro de cálculo de las predicciones de cobertura, cada pixel del mapa es considerado como un usuario no interferente. Los usuarios se configuran con un perfil donde se definen los siguientes parámetros:

- **Servicio:** toma en consideración los servicios portadores (Bearers) máximos y mínimos que se tienen definidos para el tipo de servicio que el usuario demanda de la red. Además de tener en cuenta las pérdidas de cuerpo de la UE, la eficiencia de canal offset y la del factor de escalamiento.
- **Movilidad:** toma en consideración la tasa de velocidad de movilidad de un UE. La movilidad tiene influencia en las predicciones de calidad de la señal, debido a que existe una relación entre la movilidad y la utilización de los servicios portadores.
- **Terminal:** dependiendo del tipo de terminal que se defina para el UE, la figura de ruido del dispositivo móvil puede variar, lo cual influye de manera directa en los cálculos de ruidos en el enlace descendente; de la misma manera, por el número de antenas disponibles en el terminal, se afectan las predicciones de cobertura en el caso de disponer de diversidad.

Las predicciones de calidad de señal se basan en los valores de la carga de tráfico en el enlace descendente y el incremento de ruido en el enlace ascendente, configurados en la sección de celdas en el eNB o calculados por simulaciones Monte Carlo para determinar la relación portadora a interferencia más ruido en cada píxel del mapa. En la Tabla 3.5 se describen los diferentes tipos de cobertura que se pueden realizar en ATOLL,

clasificados según su nivel o calidad de señal y su dependencia con el tráfico que gestiona la red.

Clasificación	Nombre	Dependencia de tráfico	Descripción
Por nivel de señal	Cobertura por Transmisor	NO	Predice el área de cobertura de un transmisor, considerando el análisis en cada pixel del mapa
	Cobertura por nivel de señal	NO	Predice el área de cobertura de los transmisores, en base a los niveles de señal del mejor transmisor en cada pixel del mapa
	Zonas de traslape	NO	Calcula zonas donde existen cobertura de dos o más transmisores
	Análisis de señal efectiva (DL) Análisis de señal efectiva (UL)	NO	Calcula el nivel de señal de los diferentes canales en ambos tipos de enlace.
Por calidad de señal	Cobertura por nivel de $C/(I+N)$ (DL) Cobertura por nivel de $C/(I+N)$ (UL)	SI	Permite predecir los niveles de interferencia, de portadora a interferencia más ruido ( $C/(I+N)$ ) para los dos tipos de enlace
	Análisis Área de servicio (DL) Análisis Área de servicio (UL)	SI	Calcula y permite visualizar los mejores Radio Bearers disponibles para cada pixel del mapa basándose en los niveles de $C/(I+N)$ de los mismos.
	Análisis de Área de servicio efectivo (DL+UL)	SI	Predice la zonas donde se tiene disponibilidad de servicio en ambos tipos de enlace
	Cobertura por Throughput DL Cobertura por Throughput UL	SI	Permite calcular y visualizar por cada pixel del mapa los canales de throughput y capacidad de celda basados en los niveles de $C/(I+N)$ y radio bearers disponibles.



Clasificación	Nombre	Dependencia de tráfico	Descripción
	Cobertura por Indicador de Calidad DL Cobertura por Indicador de Calidad UL	SI	Calcula y presenta los diferentes indicadores de calidad basándose en el $C/(I+N)$ por cada pixel del mapa.

**Tabla 3.5. Tipo de predicciones de cobertura en ATOLL**

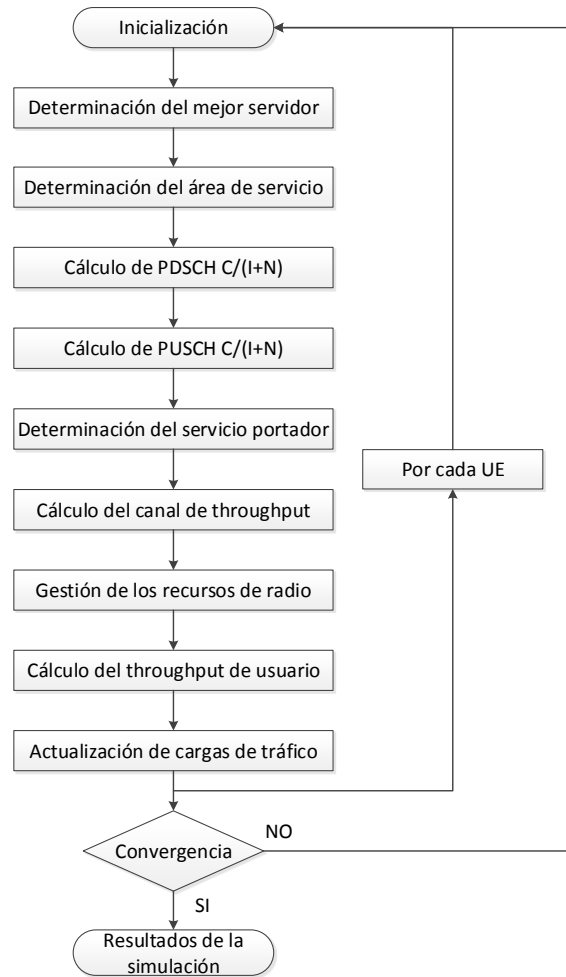
### 3.2.5. Simulación de Monte Carlo

La técnica Monte Carlo se usa para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. ATOLL utiliza este algoritmo para generar la distribución geográfica de usuarios con una demanda de tráfico determinada.

A continuación se detalla cada parte del esquema del algoritmo de simulación presentado en la Figura 3.3:

- **Inicialización:** ATOLL realiza una distribución de usuarios en base a la información de tráfico (perfil de usuario, densidad, movilidad, entorno) previamente ingresada y configurada. Con esto, cada usuario que se genere en cada pixel del mapa, contará con una asignación de servicio, movilidad y terminal específico de acuerdo al tipo de perfil que se le haya asignado. La distribución probabilística para representar el comportamiento del tráfico de los usuarios está de acuerdo a una función de Poisson.
- **Determinación del mejor servidor:** Por cada usuario generado, se realiza el cálculo en base a los niveles de señal de cada transmisor que brinde cobertura en ese punto, seleccionando aquella con la que tenga mayor potencia de señal recibida.

- **Determinación del área de servicio:** en este paso, por cada usuario generado se determina si se encuentra dentro del área de cobertura de su mejor servidor. Esta determinación del área de servicio debe cumplir la siguiente condición: La señal de EPRE (Energía por Elemento de Recurso, por sus siglas en inglés) debe ser mayor o igual que el mínimo valor de RSRP (Señal de referencia Recibida por elemento de recurso, por sus siglas en inglés) definido por cada transmisor.
- **Cálculo de enlace descendente:** se procede a calcular  $C/(I+N)$  de los canales de referencia del enlace descendente: SS, PBCH, PDSCH, PDCCH, por cada terminal generado por pixel en el mapa. De acuerdo a los niveles de  $C/(I+N)$  del canal PDSCH, se asigna el mejor servicio portador (Bearer), para posteriormente conceder los respectivos recursos de radio de acuerdo a los parámetros de tráfico configurados y calcular la eficiencia de canal por usuario.
- **Cálculo de enlace ascendente:** presenta un proceso similar al cálculo de enlace descendente. Se determina el  $C/(I+N)$  de los canales de referencia del enlace ascendente: PUSCH, PUCCH y se realiza un control de potencia con la finalidad de reducir la interferencia en el enlace en mención. El cálculo de la eficiencia de canal por cada usuario se define por los recursos de radios asignados de acuerdo a las mediciones de señal del  $C/(I+N)$  de los canales de PUSCH y PUCCH.
- **Resultados:** Finalizados los pasos previos, se actualizan los valores de Carga de Tráfico y el Incremento de ruido en el enlace de subida, en relación al total de recursos usados por cada transmisor. De acuerdo a los valores del Incremento de ruido y su valor máximo en el enlace ascendente por cada transmisor, se realiza el control de potencia en UE para que sean considerados en las próximas iteraciones de la simulación.



**Figura 3.3. Algoritmo de simulación de tráfico en ATOLL**

Una vez que los resultados de las iteraciones superen las pruebas de convergencia, se da por finalizado la simulación y se presentan los resultados. Los parámetros a tabular en la simulación por cada iteración son los siguientes:

- Cargas de Tráfico enlace descendente y ascendente
- Incremento de ruido ascendente
- Estados de usuarios (conectados, inactivos, fuera de servicio)

- Número de usuarios conectados en enlace descendente y ascendente

En la Figura A.5 del anexo se muestra el resultado de la simulación incluyendo los datos estadísticos.

### **3.3. Optimización de una red LTE en ATOLL**

La optimización de una red de telecomunicaciones móviles, es un proceso continuo y complejo por la diversidad de parámetros físicos y lógicos que se configuran para mejorar la cobertura y la eficiencia del canal, aminorar la latencia, y presentar una integración efectiva y sin complicaciones. Este proceso empieza con pruebas de recorrido RF donde se prueban todos los parámetros de desempeño y luego se registran en campo cuando la red está activa; estas pruebas incluyen también los diferentes escenarios de cobertura y propagación utilizando el respectivo modelo.

Por último, los datos de campo sirven para ajustar los parámetros iniciales que mejoran el desempeño y la cobertura de la red. En lugar de ser un conjunto de procedimientos que caractericen el desempeño y la cobertura de la red en un área determinada, la optimización es un proceso iterativo sin cantidad de pasos específicos involucrados sino que depende de la naturaleza de cada red, de su entorno geográfico y del tipo de infraestructura previamente instalada [44].

En el presente estudio se enfoca en la configuración del modelo de propagación, los parámetros lógicos de optimización y la predicción de cobertura, vecindades, reuso de frecuencias y planificación de la identificación de las celdas físicas.

#### **3.3.1. Configuración del modelo de propagación**

Como se detalla en la Sección 0, un modelo de propagación es una expresión matemática y de algoritmos que representan las características de la interfaz radio en un entorno dado. En un software RNP (Planificación de redes de radio, por sus siglas en inglés), es importante realizar la calibración del modelo de propagación de tal manera que los parámetros estén lo más ajustados posibles a su entorno para que la predicción sea precisa,

obteniendo valores aproximados a la realidad de cobertura, capacidad y disponibilidad de la red.

El modelo que se emplea es el SPM (Modelo de Propagación Estándar, por sus siglas en inglés), descrito en la Sección 0, debido a que se ajusta al rango de frecuencias y la cobertura en donde va a operar la red de LTE.

En ATOLL, para visualizar y ajustar los parámetros debido a los diferentes entornos geográficos se debe realizar la siguiente secuencia de comandos a partir de la pestaña de trabajo y que se presenta en la Figura A.6 del anexo: *Parameters* → *Propagation Models* → *Standard Propagation Model Properties* → *Clutter*.

Una vez realizado la respectiva calibración del modelo de propagación, se lo establece como el modelo fijo a emplear en la red a través de la ejecución de los siguientes comandos y que se presentan en la Figura A.7 del anexo: *Transmitters* → *Properties* → *Propagation Model*.

### **3.3.2. Planificación de cobertura**

Con el modelo de propagación seleccionado y ajustado al entorno geográfico en el que se va a trabajar, lo siguiente es configurar el tipo de predicción que registrará la simulación y su respectivo análisis. La predicción de cobertura, presenta el resultado final en base a las condiciones de cobertura previamente establecidas; el cálculo se lo realiza mediante el uso de matrices de pérdida de trayectoria y entorno geográfico que se configuran en el modelo de propagación.

ATOLL, permite al usuario visualizar de diferentes formas los resultados de sus predicciones de cobertura por medio de histogramas o cualquier otro tipo de representación gráfica en el mapa de trabajo. Además, permite seleccionar los diferentes atributos que se pueden visualizar en el mapa, y la

forma de visualizarlos. El proceso de creación de una predicción de cobertura se detalla en la Figura A.8 del anexo.

### 3.3.3. Configuración de servicios

Como ya se mencionó en la Sección 3.2, para realizar el modelamiento del tráfico en una herramienta RNP, se deben configurar los diferentes tipos de servicios que puede proveer la red para el perfil de usuarios establecidos. En la simulación, se van a utilizar los dos tipos de servicios descritos en la Tabla 3.6.

Nombre	Tipo	Mejor Bearer		Prioridad	Max. Demanda de Throughput (Kbps)		Min. Demanda de Throughput (Kbps)		Tasa requerida promedio (Kbps)	
		Desc.	Asc.		Desc.	Asc.	Desc.	Asc.	Desc.	Asc.
Descarga FTP	DATOS	15	15	0	1000	10	0	0	10	10
Navegación WEB	DATOS	15	15	1	128	64	64	64	64	32

**Tabla 3.6. Configuración de los tipos de servicio**

De la Tabla 3.6 se puede observar que los recursos de radio se asignan a un determinado servicio de acuerdo a la prioridad 0, que es el más bajo, o prioridad 1, que es el más alto; adicionalmente, la demanda de servicios portadores (Bearer) es alta para así obtener una mayor modulación, lo que a su vez se traduce en una mejor eficiencia de canal (throughput) para el usuario en los enlaces ascendentes y descendentes, respectivamente.

Para ingresar estos parámetros de configuración de los servicios de Descarga FTP y de Navegación Web que se describen en la Figura A.9 y Figura A.10 del anexo respectivamente, se realiza la siguiente secuencia de comandos a partir del menú *Parameters* → *Traffic Parameters* → *Services*.

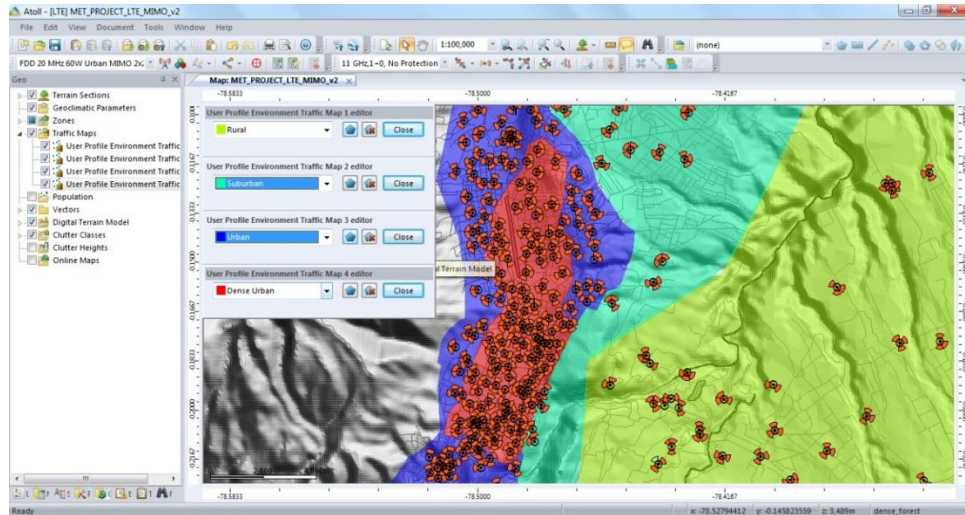
### 3.3.4. Mapas de tráfico

Los mapas de tráfico ayudan a determinar el número de usuarios que hay una determinada zona geográfica, su perfil y el tipo de servicio que estos demandan. En ATOLL, se pueden establecer tres tipos de mapas de tráfico:

- **Mapa de tráfico por sector:** se construye a partir de datos reales de carga por sector de la red, disponibles por parte del operador. Para que este tipo de mapa funcione, es necesario que la herramienta esté conectado al Centro de Operación y Mantenimiento del operador a través del módulo OMC de ATOLL. Este módulo recopila la información en tiempo real de cada transmisor en toda la celda, lo que permite tener una predicción más ajustada a la realidad con respecto a las condiciones de operación de la red.
- **Mapa de tráfico por perfil de usuario:** este mapa de tráfico, se basa en datos estadísticos de perfiles de usuario habituales recogidos normalmente a través de investigaciones de mercado. Es un mapa de tráfico bastante práctico, cuando se trata de realizar el despliegue de una nueva red, basado en objetivos de cumplimiento cuando no se cuenta con información relacionada a densidad poblacional o porcentaje de penetración del operador.
- **Mapa de tráfico por densidad de usuario (No. Usuarios / Km<sup>2</sup>):** este tipo de mapas de tráfico se construye a partir de densidades de población en la zona a estudiar. Cada zona delimitada, agrupa una cantidad de usuarios que cuenta con su respectivo tipo de servicio, movilidad y entorno.

En este estudio se utiliza el mapa de tráfico por perfil de usuario, debido a que se conoce el tipo de usuario en la red, el tipo de servicio y el tiempo que estará en uso el recurso en la red.

Los mapas de tráfico permiten delinear polígonos en el mapa digital geográfico, correspondientes al tipo de entorno, que guarda relación con la zona en la que se está generando. En la Figura 3.4 se visualiza el resultado final al momento de crear el polígono.



**Figura 3.4. Creación de un nuevo mapa de tráfico**

### 3.3.5. Planeación de vecindades

La planificación y creación de una lista de vecindades es un proceso importante en la fase de optimización de una red de telefonía móvil. La lista de vecindades que se genera para cada transmisor debe ser actualizada frecuentemente ya que esto permite que los UEs lleven a cabo el proceso de re-selección y traspaso de celdas cuando independientemente si están conectados o no. Esto significa que, al tener configurada una lista de vecindades, el usuario dispone de continuidad del servicio y acceso a la red independiente del estado en que se encuentre el UE. Toda herramienta RNP debe proveer los medios para la creación y gestión de relaciones de adyacencias entre los transmisores. [44]



Es importante también mencionar que la planificación de vecindades es el inicio del proceso de la planificación de frecuencias, identificación de celdas físicas, y la asignación de recursos de radio que se otorgan al UE.

ATOLL, permite realizar la asignación de la lista de vecindades de manera manual y automática; este proceso se lo observa en Figura A.11.

### **3.3.6. Planeación de frecuencias**

Ya que el espectro radioeléctrico es un recurso limitado para los operadores móviles, se recurre a la planificación de frecuencias a través de la técnica de reuso. El reuso de frecuencia permite reutilizar canales de radio en distintas zonas geográficas y garantizar un nivel de interferencia controlado siempre y cuando la red esté diseñada correctamente [39].

ATOLL permite realizar la asignación de frecuencias de manera manual o automática. Con la finalidad de reducir al mínimo la interferencia inter-celular en la red bajo estudio, se utiliza la asignación automática de frecuencia para obtener la matriz de interferencias, distancias de reuso, además del listado de vecindades por transmisor previamente generado.

En la Figura A.12 del anexo, se muestra el proceso para la asignación de frecuencias de manera automática en ATOLL.

### **3.3.7. Planificación de Physical Cell ID**

La función del *Physical Cell ID* permite al UE poder identificar al transmisor, con la finalidad de que el UE pueda decodificar las señales de referencia que se generan por parte del eNB y así determinar la calidad del canal.

Cuando se implementan nuevos eNBs dentro de la red de telefonía móvil, es necesario realizar la asignación de *Physical Cell ID* para cada transmisor, para evitar las colisiones con sus respectivos vecinos que están definidos en la lista de vecindades de un transmisor. Si dos transmisores tienen el mismo

*Physical Cell ID* y estos transmiten y reciben señales a un mismo UE, el UE no podrá distinguir las dos celdas. Los *Physical Cell ID* son números enteros dentro del rango de 0-503.

De la misma manera que en los casos anteriores, la asignación de *Physical Cell ID*, se lo va a realizar de manera automática. En la Figura A.13 del anexo se presenta el proceso para esta configuración en la herramienta ATOLL.

### 3.4. Implementación de MIMO en ATOLL

Como se definió en la Sección 2.8 respecto a MIMO, en un sistema de telecomunicaciones, se considera toda estrategia que usa más de una antena para enviar y recibir señales en una misma frecuencia.

En ATOLL, se pueden realizar configuraciones avanzadas que permiten manipular parámetros de transmisión del eNB y de los equipos UE. Es así, que se puede realizar la configuración MIMO en cuatro escenarios:

- **Diversidad:** esta técnica consiste en utilizar más de una antena en la transmisión o recepción para enviar más de una vez una misma señal. En el receptor, todas las señales recibidas se combinan de tal manera que la señal final es la más robusta a interferencias en comparación a que si la señal se la enviara en una configuración punto a punto.
- **SU-MIMO:** emplea más de una antena en el transmisor, por la que envían diferentes señales por cada una de ellas. De igual manera en el receptor se puede emplear más de una antena para receptar las diferentes señales transmitidas. Una de las consideraciones que se debe tener para implementar esta técnica, es que se debe contar con buena cobertura.
- **MU-MIMO:** Se aplica esta técnica en el enlace de subida en aquellos transmisores que tienen más de una antena de recepción. Esta técnica se basa en multiplexar a dos usuarios que presentan buenas condiciones de

canales de radio de un recurso en común en el dominio del tiempo y frecuencia.

- **AMS:** esta técnica permite intercambiar la técnica de SU-MIMO con el de Diversidad, dependiendo de las condiciones de los canales de radio.

### 3.4.1. Configuración de Parámetros

Para realizar la simulación de MIMO, ATOLL permite configurar los equipos del transmisor (eNB) y del receptor (UE), así como sus respectivos niveles de aceptación y ganancias, asemejando escenarios en condiciones lo más ajustadas posibles a un comportamiento real de la red. Los parámetros que se pueden configurar en esta herramienta son:

1. **Modo de Transmisión / Recepción en el eNB:** permite seleccionar la técnica transmisión y recepción del lado de la estación base. Las opciones disponibles son:
  - Diversidad
  - SU-MIMO
  - MU-MIMO
  - AWS
2. **Modo de Transmisión / Recepción en el UE:** permite seleccionar la técnica de transmisión y recepción del lado de la terminal de usuario. Las opciones disponibles son:
  - Arreglo de Antenas
  - MIMO
3. **Número de Puertos en la antena:** consiste en configurar el número de puertos de antena en el transmisor y receptor.
4. **Configuración del umbral de AWS:** consiste en fijar un valor de referencia para que la red pueda tomar la decisión de conmutar entre la

técnica de diversidad y MU-MIMO dependiendo de las condiciones de radio.

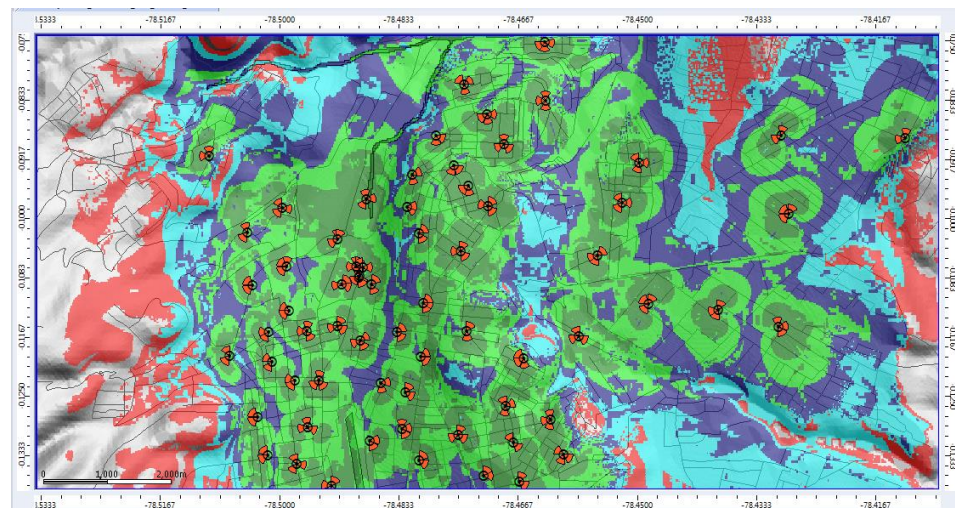
5. **Configuración del umbral de MU-MIMO:** consiste en fijar un valor mínimo de C/N que deben alcanzar las señales de referencia en el enlace descendente para poder implementar MU-MIMO. En caso de que el valor sea mayor al umbral se puede utilizar la técnica de MU-MIMO en el enlace ascendente.
6. **Ganancias de MU-MIMO:** representa la ganancia que se le otorga a cada usuario habilitado con MU-MIMO.
7. **Ganancia SU-MIMO y diversidad:** se puede manipular las ganancias de SU-MIMO y diversidad en los equipos del transmisor y receptor de acuerdo a los siguientes variables:
  - Por servicios portadores
  - Tipos de movilidad
  - Máximo BLER
  - Número de puertos de antena de transmisión y recepción
  - Por zonas geográficas

#### 3.4.2. Simulación de MIMO en LTE

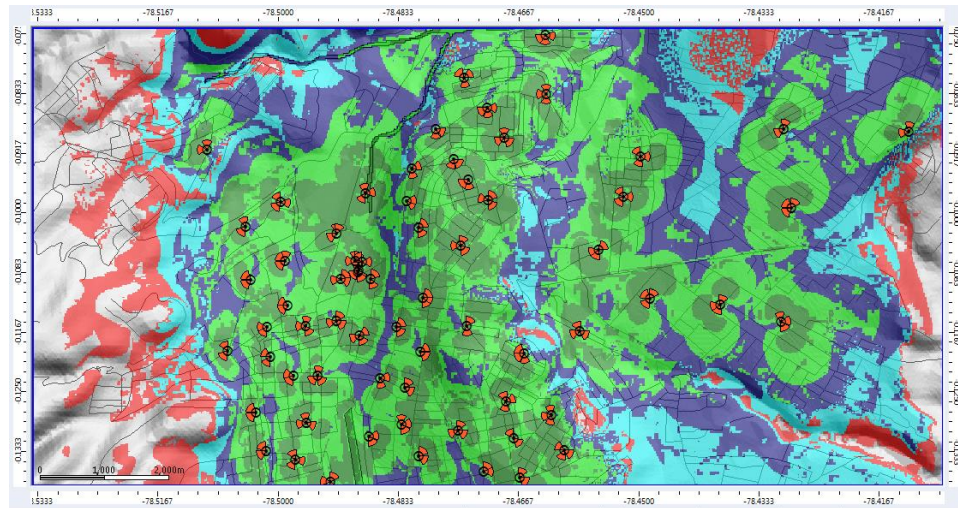
Dentro del proceso de simulación es importante considerar que la capacidad del canal MIMO crece linealmente con el número de antenas utilizadas siempre y cuando el entorno en el que se encuentre funcionando la red tenga un contorno geográfico rico en elementos dispersores. Para este caso, hay que considerar que el modelo de propagación utilizado es el SPM, y que gracias a este modelo es posible identificar las diferencias básicas de desempeño de la red al implementar esta técnica sobre LTE.

Para la ejecución de este procedimiento se ejecutan los siguientes pasos a partir del menú de trabajo *Network* → *Transmitter* → *Properties* → *Cell* → *Diversity Support*. Este procedimiento se muestra en la Figura A.14 del anexo. Una vez configurado los parámetros de simulación MIMO en cada transmisor, se deben configurar sus puertos de transmisión y recepción, por lo que a continuación se realiza el siguiente procedimiento a partir del menú *Network* → *Transmitter* → *Open Table* → *Number of Transmission Antenna Ports*. En la Figura A.15 del anexo se muestra este procedimiento.

La simulación empieza con la configuración de parámetros revisados anteriormente en este apartado y la visualización de un escenario en la Figura 3.5, donde se utiliza una antena en el transmisor y una en el receptor (MIMO 1x1). Luego, se realiza la configuración en la simulación para mostrar un escenario, en la Figura 3.6 con cuatro antenas en el transmisor y una en el receptor (MIMO 4x1).



**Figura 3.5. Predicción de cobertura en red LTE con MIMO 1x1**



**Figura 3.6. Predicción de cobertura en red LTE con MIMO 4x1**

De manera gráfica se aprecia que con MIMO, bajo las condiciones de modelo de propagación utilizado y el entorno geográfico, se incrementa ligeramente el nivel de cobertura. En el capítulo 4 de este documento, se amplían los resultados obtenidos y el respectivo análisis de la simulación.

### **3.5. Implementación de Agregación de Portadora en ATOLL**

Tal como se indicó en la Sección 2.9, la agregación de portadora es la técnica mediante la cual se mejora la eficiencia espectral, soportando tasas de datos de hasta 1 Gb/s en el enlace descendente y hasta 500 Mb/s en el ascendente, usando múltiples CCs (Componentes de Portadora, por sus siglas en inglés) para alcanzar el ancho de banda requerido para la transmisión. La agregación de portadoras es una de las características que más resaltan en las redes avanzadas de LTE, debido a que su implementación mejora la velocidad de los datos, la capacidad de la red, y simplifica la gestión del tráfico e incrementa las zonas de cobertura [28].

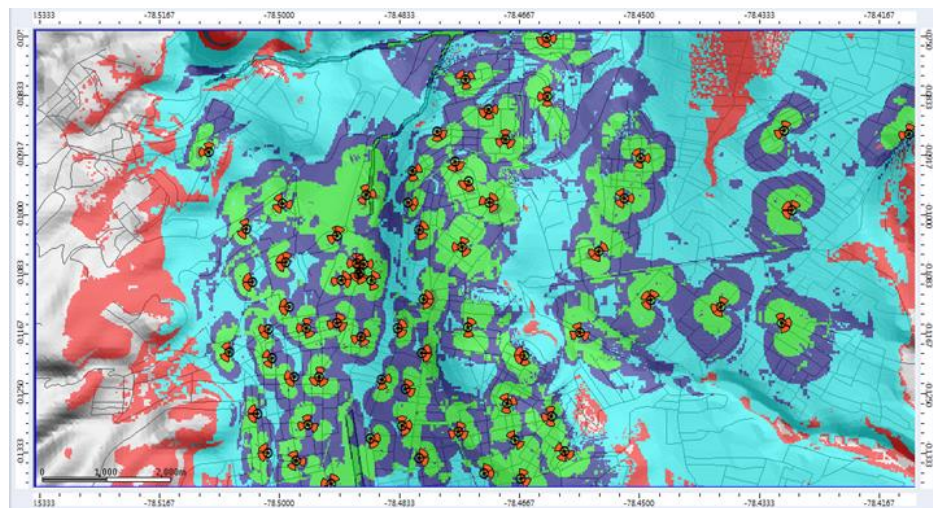
ATOLL permite realizar una simulación simultánea de varias portadoras en una red LTE. La configuración se la realiza en el lado del transmisor y se debe tener en consideración el modelo de propagación a utilizar, el modelo de antena, y que éstas trabajen en las bandas de operación de la red.

### 3.5.1. Configuración de Parámetros

Para realizar la agregación de portadora, incluyendo un CC en la red LTE a configurar, es necesario realizar la siguiente secuencia de comandos a partir del menú de configuración *Network* → *Transmitter* → *Properties* → *Cells*. Este procedimiento se lo visualiza en la Figura A.16..

### 3.5.2. Simulación de Segunda Portadora en ATOLL

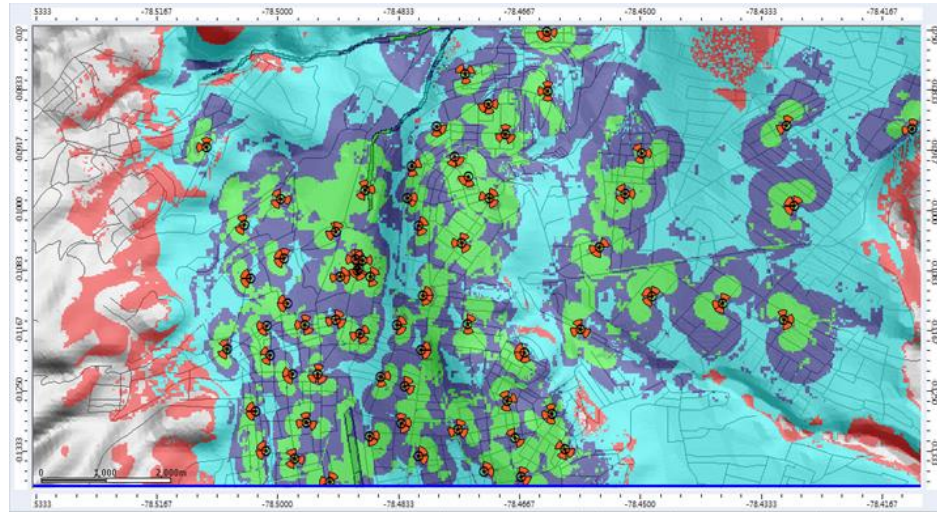
En el proceso de simulación se considera una red LTE sin ninguna técnica MIMO previamente implementada. Además, se mantiene la configuración de los parámetros iniciales del entorno geográfico y el modelo de propagación SPM. Se realiza la configuración para visualizar los resultados en dos escenarios: en la Figura 3.7 se muestra la predicción de cobertura en una red LTE estándar, con una sola portadora y en la Figura 3.8 se muestra el efecto de la agregación de segunda portadora.



**Figura 3.7. Red LTE Estándar (Portadora Simple)**

De manera gráfica se aprecia que con la agregación de una segunda portadora, bajo las condiciones de propagación y el entorno geográfico

establecidos, se mejora en los niveles de cobertura. En el capítulo 4, se amplían los resultados obtenidos y el respectivo análisis de esta simulación.



**Figura 3.8. Red LTE con dos portadoras: 700 MHz y 2100 MHz**



## CAPÍTULO 4

### 4. ANALISIS Y RESULTADOS

En función de las consideraciones que asemejan el comportamiento real de una red LTE y de las simulaciones realizadas en el Capítulo 3, en esta sección se presentan los resultados obtenidos y se analiza en función de los objetivos planteados en la Sección 1.3 de este documento.

#### 4.1. Definición de los escenarios y análisis

Como ya se revisó en el Capítulo 3, hay parámetros que deben ser considerados para el dimensionamiento de una red de telefonía móvil, tales como la determinación de las áreas que deben ser cubiertas, el número de estaciones base que se necesitan implantar junto con el número de usuarios y la tasa a la que se entrega con éxito un paquete de datos; es por esto que, las variables que van a ser analizadas en este estudio son las que se detallan a continuación:

- **Análisis de Cobertura.-** lo que permite identificar el nivel de señal que perciben los usuarios de la red LTE.
- **Análisis de throughput.-** lo que permite estimar el nivel de eficiencia de canal provisto a los usuarios de la red LTE.

- **Análisis de Capacidad: lo que permite estimar la cantidad de usuarios y los** diferentes tipos de servicios que puede soportar la red.

Por motivos prácticos, se ha establecido un promedio del número de eNBs y de subscriptores de LTE que disponen las tres operadoras de telefonía móvil que funcionan en Ecuador. Para establecer este promedio, se utilizó como referencia la información de líneas activas por tecnología y de la participación de mercado de estas operadoras disponibles en la página web del ente de regulación y control [45].

#### **4.1.1. Especificación de escenarios de estudio**

Es importante indicar que para realizar el análisis comparativo entre los diferentes escenarios, se parte de un escenario base o referencial, moldeado con los criterios descritos en el Capítulo 3, y que a partir de este escenario base, se modifican los diferentes parámetros que darán lugar a los nuevos escenarios de estudio, los cuales se definen a continuación y cuyo análisis se presenta en las Secciones 4.2 - 4.7:

- Estudio de la Diversidad
  - Escenario base: 20 Mhz de Ancho de Banda – una portadora AWS – Baja carga de trafico
  - Comparación con alta carga de trafico
  - Agregación de antenas tanto en el transmisor como en el receptor
- Estudio de la Multiplexación espacial
  - Escenario base: 20 Mhz de Ancho de Banda – una portadora AWS – Baja carga de trafico
  - Comparación con alta carga de trafico
  - Agregación de antenas tanto en el transmisor como en el receptor
- Estudio de Adaptive MIMO Switching

- Escenario base: 20 Mhz de Ancho de Banda – una portadora AWS – Baja carga de trafico
  - Comparación con alta carga de trafico
  - Agregación de antenas tanto en el transmisor como en el receptor
- Estudio de MU-MIMO
    - Escenario base: 20 Mhz de Ancho de Banda – una portadora AWS – Baja carga de trafico
    - Comparación con alta carga de trafico
    - Agregación de antenas tanto en el transmisor como en el receptor
- Estudio de SU-MIMO
    - Escenario base: 20 Mhz de Ancho de Banda – una portadora AWS – Baja carga de trafico
    - Comparación con alta carga de trafico
    - Agregación de antenas tanto en el transmisor como en el receptor
- Estudio de Agregación de segunda portadora
    - Escenario base: 20 Mhz de Ancho de Banda – una portadora AWS – Baja carga de trafico
    - Comparación con alta carga de trafico
    - Agregación de antenas tanto en el transmisor como en el receptor
    - Agregación de una portadora adicional en la banda de 700 MHz.

#### **4.1.2.Limitaciones del análisis**

Las limitantes que forman parte del presente análisis son:

- Tal como se se detalla en la Tabla 3.5, ATOLL cuenta con la posibilidad de utilizar diversos tipos de predicciones dependiendo del nivel o la calidad de la señal. Debido a la naturaleza y el alcance del presente trabajo, para predecir el nivel de señal, solo se considera la predicción de

cobertura por transmisor y para calidad de la señal, se utilizan las predicciones de cobertura por throughput y por área de servicio efectivo.

- La forma de presentar los resultados de las simulaciones que tiene ATOLL es de forma gráfica; sin embargo, debido a la cantidad de datos producto de la naturaleza geográfica de Quito (zona de estudio) y el número planificado de eNBs no es posible visualizar el resultado de las predicciones de manera gráfica, por lo que es necesario trasladar estos a hojas de cálculo para que a partir de ahí los resultados se puedan presentar en tablas y figuras.
- El número de iteraciones utilizadas en la simulación Monte Carlo es de 10; esto debido a que, de manera empírica, se ha detectado que el algoritmo utilizado por ATOLL entrega información bastante precisa con este número de iteraciones; un número mayor de iteraciones no varían significativamente los resultados de la simulación.

#### **4.2. Estudio de la Diversidad**

En la Sección 2.6.2 se definió que la técnica de diversidad espacial guarda relación con el número de antenas que se pueden configurar tanto en el transmisor como en el receptor, con la finalidad de obtener una señal más robusta en los enlaces descendente y ascendente, contra la interferencia producida por el propio sistema o por un factor externo.

Para la simulación se parte de un escenario base, que incluye un sistema estándar MIMO 1x1 (1 antena en el transmisor, y 1 en el receptor) para contrarrestar sus resultados con escenarios de diferentes configuraciones de tráfico donde se analizan los factores de cobertura, capacidad y throughput.

En la Tabla 4.1, se muestran los resultados de la simulación bajo el escenario base con portadora de 20 MHz y baja carga de tráfico, mientras que en la Tabla 4.2 se observan los resultados en un escenario de alto tráfico de datos.

Tipo de Simulación	Sin MIMO	Div 2X1	Div 1X2	Div 1X4	Div 4X1	Div 2X2	Div 4X2	Div 2X4	Div 4X4	Div 8X1	Div 8X2	Div 8X4
Total de Usuarios	2852.8	2941	2898	2935	2869	2964	2893.2	2871	2863.1	2836.4	2865.2	2869.8
Demanda - Downlink	1375.0	1415.2	1386.7	1404.7	1358.8	1409.1	1392.2	1272.4	1386.6	1365.2	1382.2	1395.9
Conectados - Downlink	1213.2	1247.2	1224.0	1242.2	1205.6	1285.5	1229.9	1125.8	1233.5	1207.8	1221.3	1236.3
Demanda - Uplink	1290.0	1315.7	1340.3	1419.4	1245.1	1378.9	1340.1	1183.7	1360.5	1254.5	1288.8	603.6
Conectados - Uplink	1073.8	1103.5	1117.2	1181.5	1036.5	1147.8	1115.5	985.3	1132.5	1044.3	1072.8	502.4
Usuarios Rechazados (%)	2.1	1.7	0.9	0.6	1.3	0.8	0.7	0.5	1.1	1.3	1.4	1.2
Sin Servicio	34.2	35.3	34.8	35.2	34.4	35.6	34.7	34.5	34.4	34.0	34.4	34.4
Saturación de Recursos	61.0	62.9	62.0	62.8	61.4	63.4	61.9	61.4	61.3	60.7	61.3	61.4

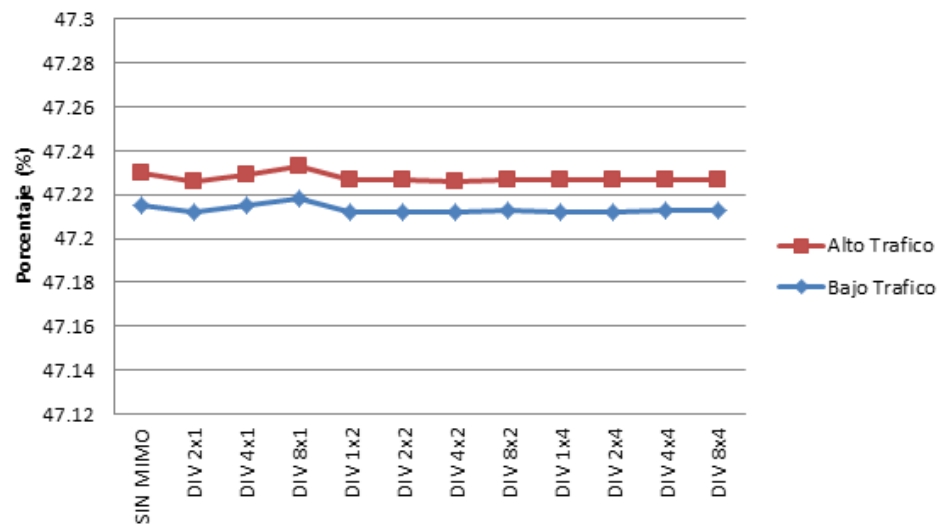
**Tabla 4.1. Simulación de escenario base (portadora 20MHz y baja carga de tráfico)**

Tipo de Simulación	Sin MIMO	Div 2X1	Div 1X2	Div 1X4	Div 4X1	Div 2X2	Div 4X2	Div 2X4	Div 4X4	Div 8X1	Div 8X2	Div 8X4
Total de Usuarios	2551.2	2623.6	2769.3	2889.1	2698.3	2654.9	2682.4	2721.4	2763.1	2689.4	2761.7	2767.1
Demanda - Downlink	1229.7	1262.5	1325.1	1382.7	1277.9	1262.1	1290.8	1206.1	1338.2	1294.4	1332.2	1345.9
Conectados - Downlink	1084.9	1112.6	1169.7	1222.7	1133.9	1151.4	1140.3	1067.2	1190.4	1145.2	1177.2	1192.1
Demanda - Uplink	1153.7	1176.6	1280.8	1397.2	1171.1	1235.0	1242.5	1122.0	1313.0	1189.5	1242.2	582.0
Conectados - Uplink	960.3	986.8	1067.5	1163.0	974.8	1028.1	1034.3	934.0	1093.0	990.2	1034.0	484.4
Usuarios Rechazados (%)	3.3	2.1	1.2	0.9	1.9	1.3	1.4	0.8	2.2	2.5	2.7	2.6
Sin Servicio	61.2	47.2	45.1	37.4	35.6	49.1	46.7	37.3	66.3	69.9	68.2	59.7
Saturación de Recursos	73.7	60.9	62.2	68.2	66.2	71.6	73.6	77.6	75.8	64.5	79.9	70.4

**Tabla 4.2. Simulación de escenario comparativo (portadora 20MHz y alta carga de tráfico)**

#### 4.2.1. Análisis de cobertura

Con respecto a los porcentajes de cobertura, en la Figura 4.1 se observa que estos valores se mantienen independientes del escenario de tráfico que cursa por la red. Esto se debe a que las técnicas de diversidad espacial no están orientadas a mejorar los niveles de cobertura, sino que están dirigidos a poder transmitir varios símbolos en paralelo y separados espacialmente, lo que resulta en un incremento de la calidad y capacidad de la red.



**Figura 4.1. Porcentaje de cobertura (RSRP > -90dBm)**

#### 4.2.2. Análisis de throughput

En la Figura 4.2 se muestra el throughput promedio por celda de cada eNB que se encuentra configurado en la red en función del porcentaje de cobertura simulando el incremento de antenas en el lado receptor tanto en escenarios de alto y bajo tráfico de datos. Mientras que, la Figura 4.3 muestra la misma función pero con incremento de antenas en el lado transmisor.

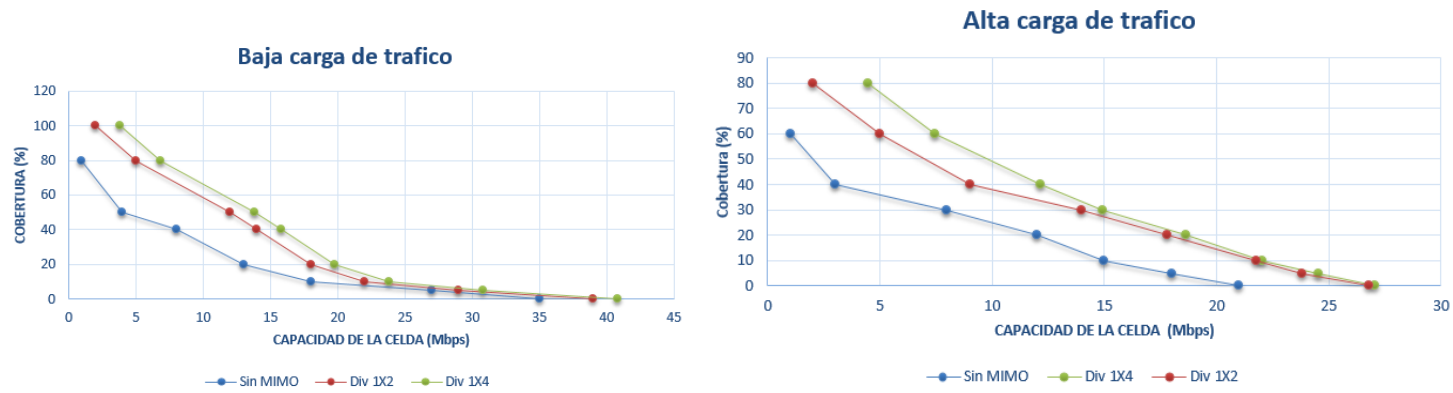


Figura 4.2. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado receptor

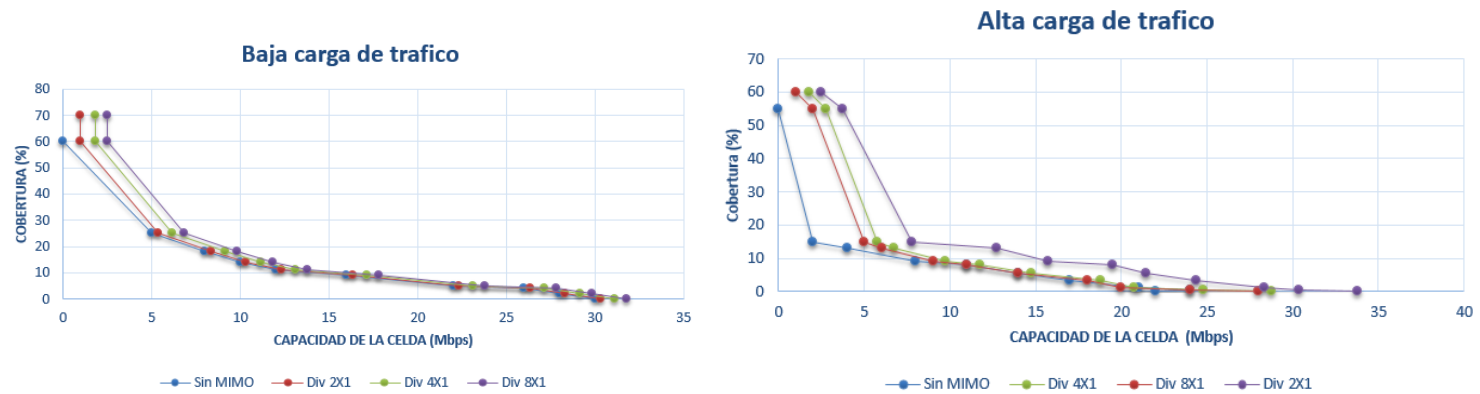


Figura 4.3. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado transmisor

De la comparación entre las figuras anteriores, se puede desprender que, independientemente del escenario, se obtienen valores bajos de throughput cuando el UE se encuentra muy distante del transmisor. Este comportamiento se debe a que los niveles de señal son mejores cuando el UE se encuentra más cerca del transmisor, debido a que utiliza poca potencia para interactuar con la red, mejorando así la relación de señal a ruido presente en el sistema.

La capacidad de la celda viene determinada de acuerdo a la teoría de Shannon donde establece que la capacidad máxima que puede obtenerse desde un elemento transmisor hacia otro receptor es afectado por el ruido

Gaussiano:  $C = B \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$ , donde:

C : Capacidad

B : Ancho de banda

S/N : Relación Señal a ruido

En las Figura 4.2 y Figura 4.3 se puede observar también que el incremento del throughput guarda relación con el despliegue de antenas que se usan tanto en el lado del transmisor como en el receptor. El factor que incide en que la capacidad de la red no se incremente acorde al número de antenas en el transmisor, se debe a que ATOLL toma en consideración el patrón de radiación de manera individual de cada antena colocado en el eNB, lo cual genera una interferencia que anula la compensación de ganancia que puede tener una técnica de Diversidad espacial, razón por la cual, no se observa un incremento significativo en la capacidad del sistema al utilizar más antenas en el lado del transmisor.



### 4.2.3. Análisis de capacidad

El análisis de capacidad permite estimar el número de usuarios que se les puede asignar recursos dedicados tanto en el enlace descendente como en el ascendente. En la Figura 4.4 se observa que la capacidad en el enlace descendente presenta un mejor desempeño cuando se incrementa el número de antenas en el lado del receptor; esto se debe a que los UEs aprovechan de mejor manera la diversidad en recepción, combinando las diferentes señales que contienen la misma información y que provienen de diferentes caminos de propagación, reconstruyendo finalmente una señal más robusta al ruido y con una mayor calidad.

Es importante resaltar que, al incrementarse la calidad de la señal, se va a tener una mejor relación señal a ruido, lo que conlleva a una mayor capacidad de la celda debido al número de usuarios y servicios que ésta puede atender.

En la Figura 4.5 se observa que la capacidad en el enlace descendente presenta un mejor desempeño cuando se disminuye la cantidad de antenas en el lado del transmisor; esto, principalmente, por la presencia de interferencia entre antenas ocasionadas por el propio eNB, nodos adyacentes o el incremento de antenas por sector debido a la falta de una correcta planificación.

Del presente análisis, se destaca que el incremento de las antenas en lado del transmisor no contribuye a una mejoría del sistema en cuanto a cobertura, capacidad y throughput. Bajo la anterior premisa se procedió a descartar las siguientes configuraciones del respectivo análisis: 2x2, 4x2, 8x2, 2x4, 4x4 y 8x4, debido a que las mejoras en el sistema ocurren cuando se incrementan el número de antenas en el lado del receptor.

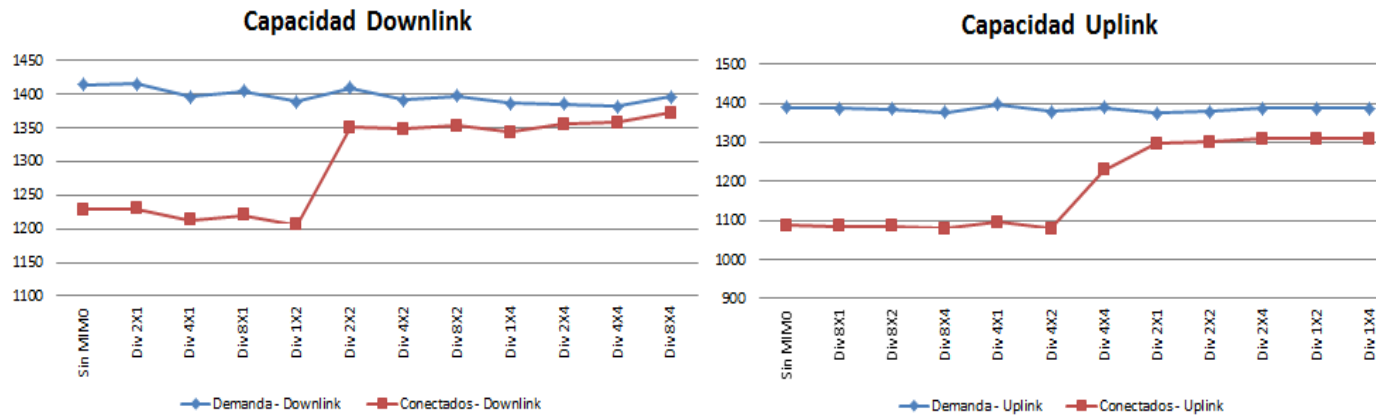


Figura 4.4. Capacidad de la red en bajo tráfico de datos

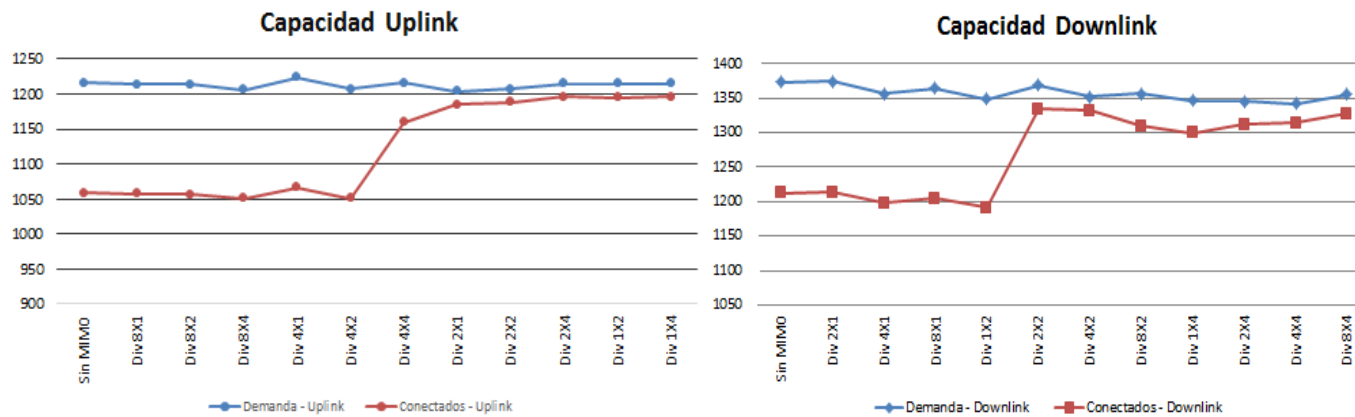


Figura 4.5. Capacidad de la red en alto tráfico de datos

### **4.3. Análisis de la Multiplexación espacial**

Como se menciona en la Sección 2.6.3 se define la multiplexación espacial, como la técnica MIMO donde cada transmisor puede enviar diferentes tramas de datos a múltiples receptores, y dichas tramas pueden ser reconstruidas de manera separada por el UE.

La representación de la configuración de las antenas, mantiene su esquema inicial: el primer número representa la cantidad de antenas que se encuentran configurados en el transmisor, mientras que el segundo número señala la cantidad de antenas que se encuentran en el receptor.

Para la simulación, se mantiene el escenario base con MIMO 1x1 y para comparar los resultados, se exponen las diferentes configuraciones de antena que se muestran en la Tabla 4.3 en donde se muestran los resultados de la simulación bajo el escenario de baja carga de tráfico, mientras que en la Tabla 4.4, se observan los resultados obtenidos en un escenario de alto tráfico de datos.

Tipo de Simulación	SIN SM	SM 2x1	SM 4x1	SM 8x1	SM 1x2	SM 2x2	SM 4x2	SM 8x2	SM 1x4	SM 2x4	SM 4x4	SM 8x4
<b>Total de Usuarios</b>	2652.6	2752	2578.3	2593.4	2643.5	2781.3	2647.5	2735.4	2435.4	2541.6	2763.3	2583.4
<b>Demanda - Downlink</b>	1278.6	1324.3	1233.7	1241.2	1252.0	1322.2	1274.0	1212.3	1179.4	1223.3	1333.0	1256.6
<b>Conectados - Downlink</b>	1128.1	1167.1	1089.0	1097.6	1110.9	1206.3	1125.4	1072.7	1049.2	1082.2	1177.8	1112.9
<b>Demanda – Uplink</b>	1199.5	1223.4	1192.5	1254.2	1147.3	1293.9	1226.3	1127.8	1157.3	1124.1	1242.9	543.3
<b>Conectados - Uplink</b>	1178.4	1201.8	1171.5	1232.1	1127.1	1271.1	1204.7	1107.9	1136.9	1104.4	1221.0	533.8
<b>Usuarios Rechazados (%)</b>	2.1	1.7	0.9	0.6	1.3	0.8	0.7	0.5	1.1	1.3	1.4	1.2
<b>Sin Servicio</b>	31.8	33.0	30.9	31.1	31.7	33.4	31.8	32.8	29.2	30.5	33.2	31.0
<b>Saturación de Recursos</b>	56.8	58.9	55.2	55.5	56.6	59.5	56.7	58.5	52.1	54.4	59.1	55.3

**Tabla 4.3. Simulación de escenario base (portadora 20MHz y baja carga de tráfico)**

Tipo de Simulación	SIN SM	SM 2x1	SM 4x1	SM 8x1	SM 1x2	SM 2x2	SM 4x2	SM 8x2	SM 1x4	SM 2x4	SM 4x4	SM 8x4
<b>Total de Usuarios</b>	2421.8	2512.6	2354	2367.8	2413.5	2539.3	2417.2	2497.4	2223.5	2320.5	2522.8	2358.6
<b>Demanda - Downlink</b>	1167.3	1209.1	1126.4	1133.2	1143.0	1207.2	1163.1	1106.8	1076.8	1116.8	1217.0	1147.2
<b>Conectados - Downlink</b>	1029.9	1065.5	994.3	1002.1	1014.2	1101.3	1027.5	979.3	958.0	988.1	1075.4	1016.1
<b>Demanda – Uplink</b>	1095.1	1116.9	1088.7	1145.1	1047.5	1181.3	1119.6	1029.7	1056.6	1026.3	1134.8	496.1
<b>Conectados - Uplink</b>	1075.9	1097.3	1069.6	1124.9	1029.0	1160.5	1099.9	1011.5	1038.0	1008.3	1114.8	487.3
<b>Usuarios Rechazados (%)</b>	3.3	2.1	1.2	0.9	1.9	1.3	1.4	0.8	2.2	2.5	2.7	2.6
<b>Sin Servicio</b>	58.1	45.2	38.4	30.7	31.9	47.0	42.1	34.2	53.4	60.3	62.3	50.9
<b>Saturación de Recursos</b>	70.0	58.3	52.8	55.9	59.2	68.5	66.4	71.3	61.0	55.7	73.0	60.0

**Tabla 4.4. Simulación de escenario comparativo (portadora 20MHz y alta carga de tráfico)**

### 4.3.1. Análisis de cobertura

De acuerdo a lo que se observa en la Figura 4.6, los niveles de cobertura no guardan correlación alguna con respecto al tráfico que cursa por la red. Esto se debe en mayor parte a que la técnica de multiplexación espacial se encuentra orientada a incrementar la tasa de transmisión de información, consiguiendo finalmente tener una alta eficiencia espectral.

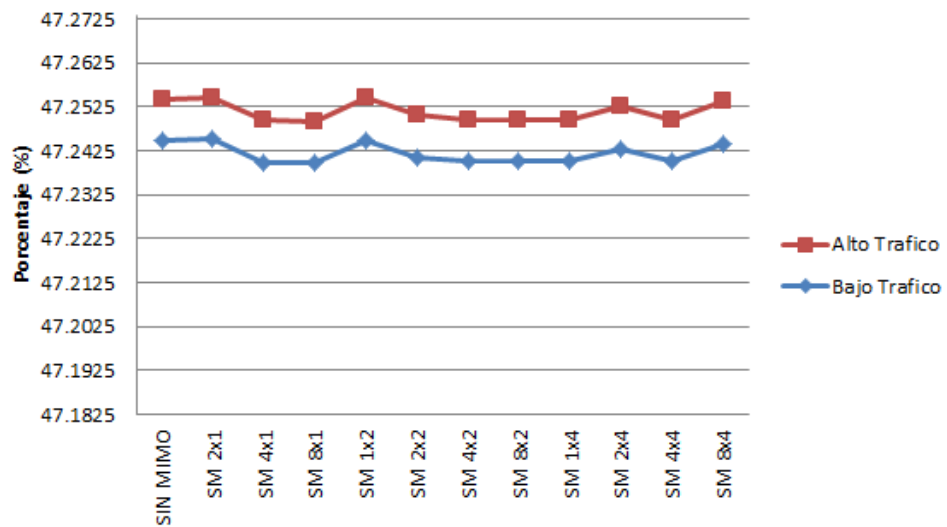


Figura 4.6. Porcentaje de cobertura (RSRP > -90dBm)

### 4.3.2. Análisis de throughput

En la Figura 4.7 se puede observar el comportamiento del throughput promedio de las celdas que se encuentran en la red con relación a la variación del número de antenas en el lado del UE, a su vez en la Figura 4.8 se puede apreciar la variación del throughput de la red en función de las antenas configuradas en el lado del transmisor.

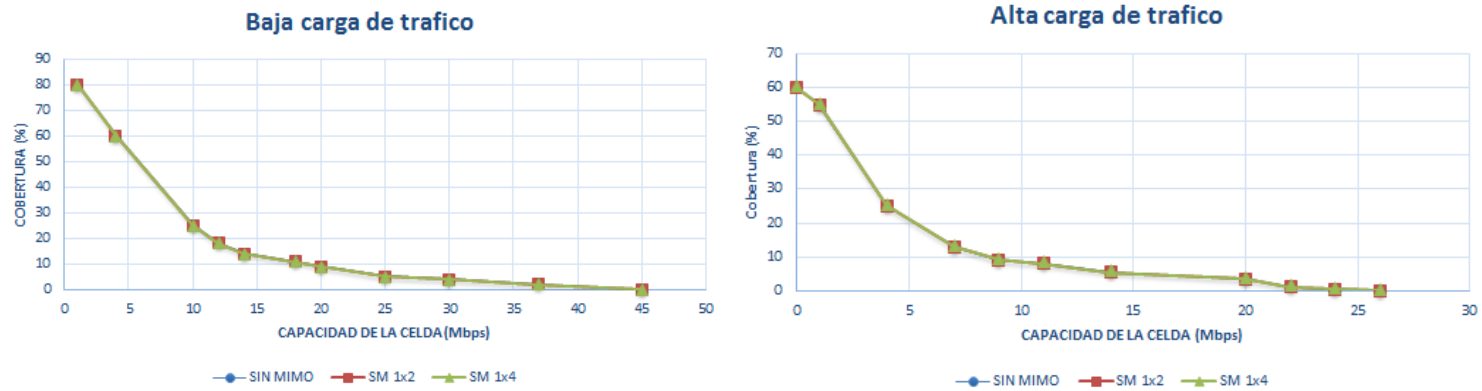


Figura 4.7. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado receptor

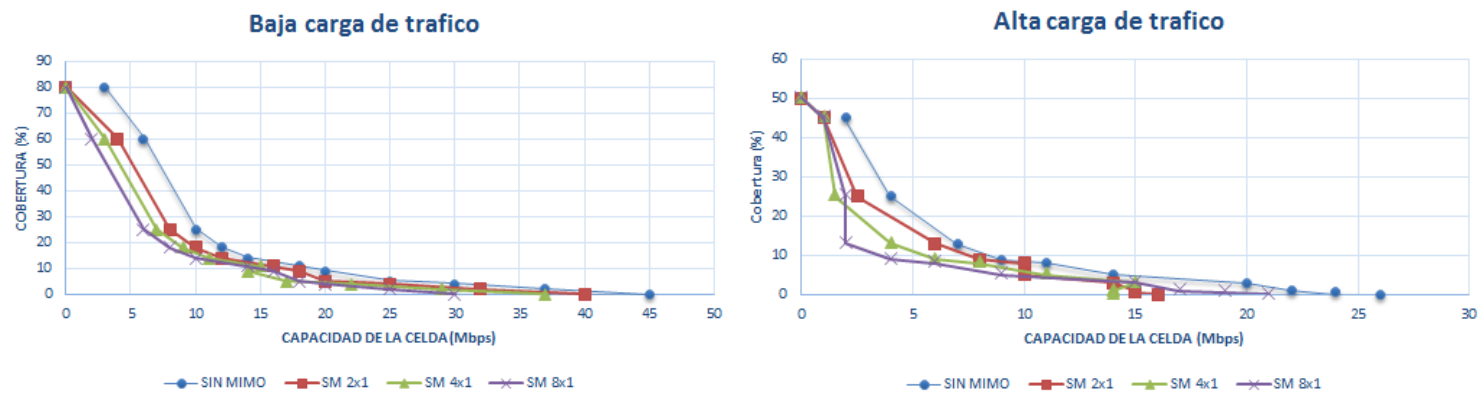


Figura 4.8. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado transmisor

De acuerdo a lo que se muestra en la Figura 4.7 el throughput promedio de la red no presenta variación con respecto al número de antenas que se colocan en el lado del receptor. Esto se debe a que la técnica de Multiplexación espacial es bastante efectiva cuando se tienen varias antenas para la transmisión y recepción de señales, y cuando éstas a su vez se encuentran separadas angularmente para evitar la interferencia que se origina en la técnica de diversidad; por lo que la técnica de multiplexación espacial se encuentra limitada al número de haces independientes que pueden existir tanto en la transmisión como en la recepción.

En base a lo anterior, y de acuerdo a la premisa de que cuando se incrementa el número de antenas en el lado del transmisor éstas irían a compartir sus características físicas (azimut, altura y modelo de antena), se observa que el desempeño de la capacidad de la red es mejor cuando no se emplea la técnica de la multiplexación espacial. Como se explica en la Sección 4.2, ATOLL considera el patrón de radiación de cada antena de manera independiente, lo que conlleva a que se genere mayor interferencia en el sistema.

#### **4.3.3. Análisis de capacidad**

Se debe considerar que la técnica de multiplexación espacial se encuentra limitada al menor número de antenas independientes que se encuentren entre el arreglo de antenas del transmisor y del receptor; es decir, que si se emplea la técnica de multiplexación espacial, por ejemplo, con un arreglo 4x1, el haz independiente que va a considerar la técnica será de uno. Es por esto que, al compararlo con el throughput obtenido de acuerdo a la Figura 4.7, la red no presenta mejorías considerables del throughput al utilizar esta técnica.

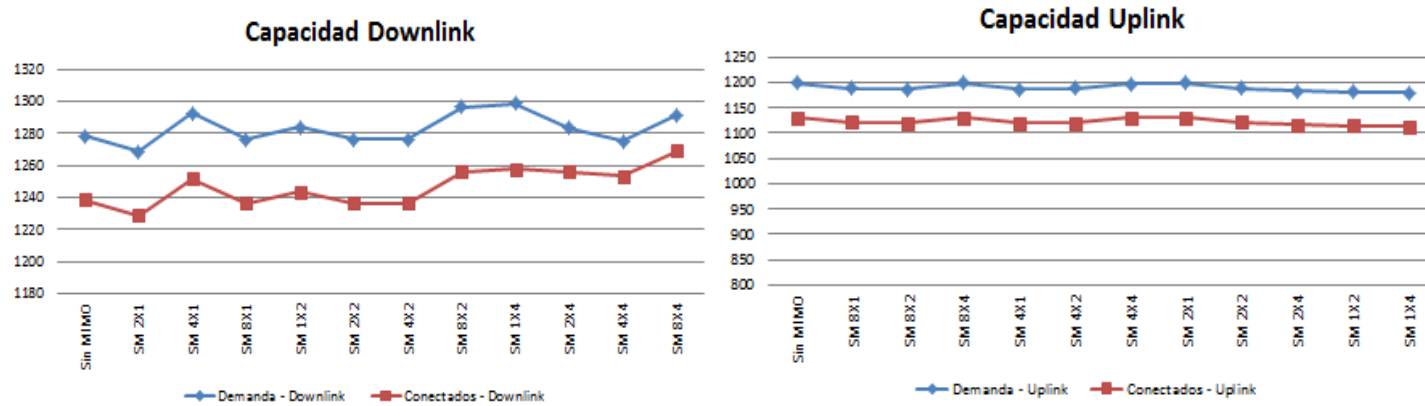


Figura 4.9. Capacidad de la red con bajo tráfico de datos

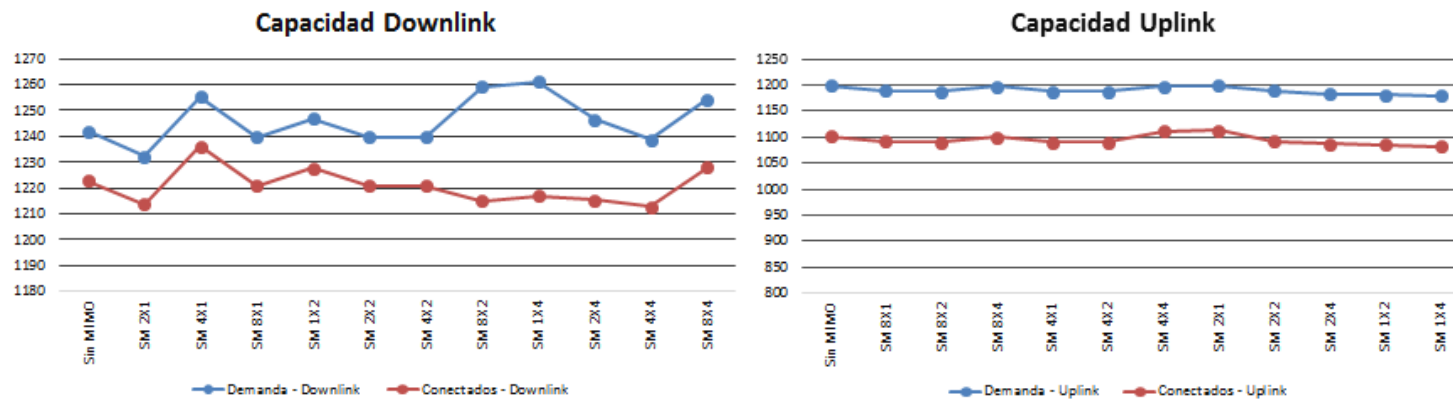


Figura 4.10. Capacidad de la red con alto tráfico de datos



En la Figura 4.9 y Figura 4.10 no se percibe mejoría cuando se emplea la técnica de multiplexación espacial tanto en el escenario de bajo tráfico como en el de alto tráfico de datos; esto debido, a que no se tienen antenas con un haz de propagación diferente a medida que se incrementa el número de antenas tanto en el lado del receptor como en el transmisor.

Debido al incremento de la interferencia que ocurre a medida que se incrementa el número de antenas del lado del transmisor, y además de que no se observa un incremento significativo en el comportamiento de la red cuando se agregan antenas en el lado del receptor, no es necesario incluir otras configuraciones de antena (2x2, 4x2, 8x2, 2x4, 4x4 y 8x4) ya que no aportan mayor diferencia para análisis por las consideraciones antes mencionadas.

#### 4.4. Estudio de Adaptive MIMO Switching

En base al análisis de los resultados obtenidos en las Secciones 4.2 y 4.3, se observa que la limitación que presentan las técnicas de diversidad y la multiplexación espacial están relacionados al número de antenas que se colocan en el lado del transmisor, ya que al compartir su configuración física terminan impactando de manera negativa el desempeño de la red.

Adaptive MIMO Switching, permite acoplar las técnicas de diversidad y multiplexación espacial en una sola función, manejando un umbral de potencia que permite establecer el uso de una de estas técnicas. El umbral de potencia se lo mide en dB, y vienen delimitado por los DLRS (Señales de referencia en el enlace descendente, por sus siglas en inglés). Los DLRS se emplean por el UE por dos razones principales: la primera es que en función de ellas es posible realizar la demodulación de la información de manera correcta y la segunda es que permite precisar la información de la calidad y las propiedades espaciales del canal de radio que la red asigna al UE.

En la Tabla 4.5 se observa la distribución de las áreas que ocupan los distintos niveles de potencia de los DLRS en el escenario base propuesta, con portadora de 20 MHz y baja demanda de tráfico.

Nivel DRFS	Denso Urbano [dB]	Rural [dB]	Sub-urbano [dB]	Urbano [dB]
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq 7$	1.23	12.21	2.13	3.21
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq 6$	1.78	11.23	1.57	1.64
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq 5$	2.31	9.51	3.14	4.15
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq 4$	2.57	10.21	2.31	3.85
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq 3$	5.231	8.15	5.231	5.231
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq 2$	6.24	7.21	7.156	4.36
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq 1$	13.53	10.21	12.215	13.215

Nivel DRFS	Denso Urbano [dB]	Rural [dB]	Sub-urbano [dB]	Urbano [dB]
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq 0$	7.85	7.85	5.24	8.215
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq -1$	11.235	6.2	10.13	10.253
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq -2$	12.25	6.31	11.28	10.36
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq -3$	12.235	4.21	11.243	12.315
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq -4$	10.24	3.21	12.015	11.12
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq -5$	9.215	2.21	8.051	7.24
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq -6$	1.24	1.215	3.15	2.34
Reference Signal C/(I+N) Level (DL) (dB) $\geq -7$	2.75	1.01	5.04	3.01

**Tabla 4.5. Cobertura de DRFS (portadora 20MHz y alta carga de tráfico)**

En acorde con la Tabla 4.5, se decide emplear como el umbral de potencia la señal de 1 dB, debido a que presenta una mejor distribución de cobertura en la zona densa urbana y de manera similar en el resto de las zonas geográficas que se emplean en el análisis, lo que permite observar las posibles variaciones que puede existir en el comportamiento de la red.

Con esta configuración, se simula el escenario base y los resultados en la Tabla 4.6, mientras que en la Tabla 4.7, se observan los resultados obtenidos en un escenario de alto tráfico de datos.

Tipo de Simulación	Sin AMS	AMS 2X1	AMS 1X2	AMS 1X4	AMS 4X1	AMS 2X2	AMS 4X2	AMS 2X4	AMS 4X4	AMS 8X1	AMS 8X2	AMS 8X4
Total de Usuarios	2862.8	2841	2818	2865	2739	2942.3	2813.2	2886.2	2812.1	2881.4	2836.2	2819.8
Demanda - Downlink	1379.9	1367.1	1348.4	1371.2	1297.2	1398.8	1353.7	1279.2	1361.9	1386.8	1368.2	1371.6
Conectados - Downlink	1217.5	1204.8	1190.2	1212.5	1151.0	1276.1	1195.9	1131.8	1211.5	1226.9	1208.9	1214.8
Demanda - Uplink	1294.6	1320.3	1303.3	1385.5	1188.7	1368.8	1303.1	1190.0	1336.3	1274.4	1275.7	593.1
Conectados - Uplink	1077.6	1107.4	1086.3	1153.3	989.5	1139.4	1084.7	990.5	1112.3	1060.8	1061.9	493.7
Usuarios Rechazados (%)	2.1	1.7	0.9	0.6	1.3	0.8	0.7	0.5	1.1	1.3	1.4	1.2
Sin Servicio	34.4	34.1	33.8	34.4	32.9	35.3	33.8	34.6	33.7	34.6	34.0	33.8
Saturación de Recursos	61.3	60.8	60.3	61.3	58.6	63.0	60.2	61.8	60.2	61.7	60.7	60.3

**Tabla 4.6. Simulación de escenario base (portadora 20MHz y baja carga de tráfico)**

Tipo de Simulación	Sin AMS	AMS 2X1	AMS 1X2	AMS 1X4	AMS 4X1	AMS 2X2	AMS 4X2	AMS 2X4	AMS 4X4	AMS 8X1	AMS 8X2	AMS 8X4
Total de Usuarios	2451.2	2723.6	2669.3	2819.1	2712.3	2714.8	2782.4	2721.3	2761.3	2781.4	2734.7	2787.7
Demanda - Downlink	1181.5	1310.6	1277.3	1349.2	1284.5	1290.6	1338.9	1206.1	1337.3	1338.7	1319.2	1355.9
Conectados - Downlink	1042.4	1155.0	1127.4	1193.1	1139.8	1177.5	1182.8	1067.1	1189.7	1184.3	1165.7	1201.0
Demanda - Uplink	1108.4	1130.5	1234.6	1363.3	1177.1	1263.0	1288.8	1122.0	1312.2	1230.2	1230.1	586.3
Conectados - Uplink	922.7	948.1	1029.0	1134.8	979.8	1051.3	1072.8	933.9	1092.3	1024.0	1023.9	488.0
Usuarios Rechazados (%)	3.1	1.9	1.5	0.9	1.6	1.2	1.7	1.1	1.8	2.0	2.1	1.9
Sin Servicio	58.8	49.0	43.5	36.5	35.8	50.2	48.5	37.3	66.3	72.3	67.5	60.1
Saturación de Recursos	70.8	63.2	59.9	66.5	66.5	73.2	76.4	77.6	75.7	66.8	79.1	70.9

**Tabla 4.7. Simulación de escenario comparativo (portadora 20MHz y alta carga de tráfico)**

#### 4.4.1. Análisis de cobertura

Conforme se observa en la Figura 4.11, la poca correspondencia que existe entre la cobertura y el tráfico, se debe a que la técnica AMS (Interruptor de MIMO adaptivo, por sus siglas en inglés), combina las técnicas de Diversidad y multiplexación espacial, donde existe una baja correlación entre la cobertura y el tráfico.

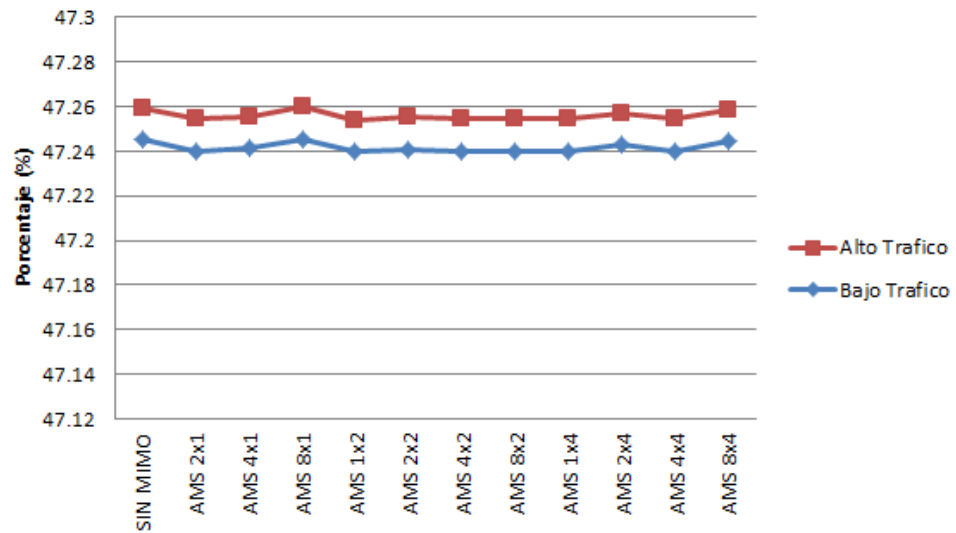


Figura 4.11. Porcentaje de cobertura (RSRP > -90dBm)

#### 4.4.2. Análisis de throughput

En la Figura 4.12 se puede observar el comportamiento del throughput promedio de la red con relación a la variación del número de antenas en el lado del UE, a su vez en la Figura 4.13 se puede apreciar la variación del throughput promedio de la red en función de las antenas configuradas en el lado del transmisor.

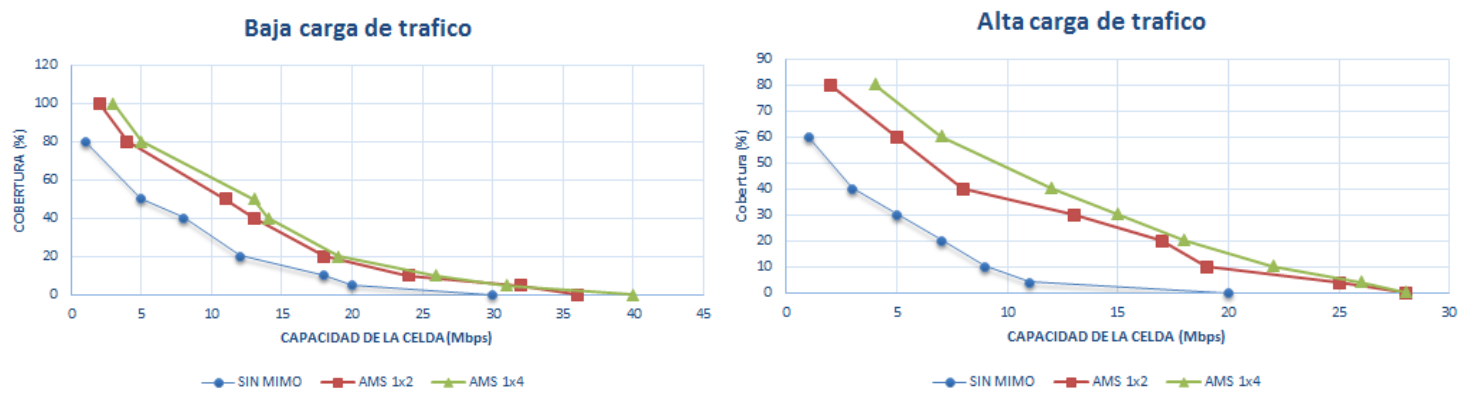


Figura 4.12. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado receptor

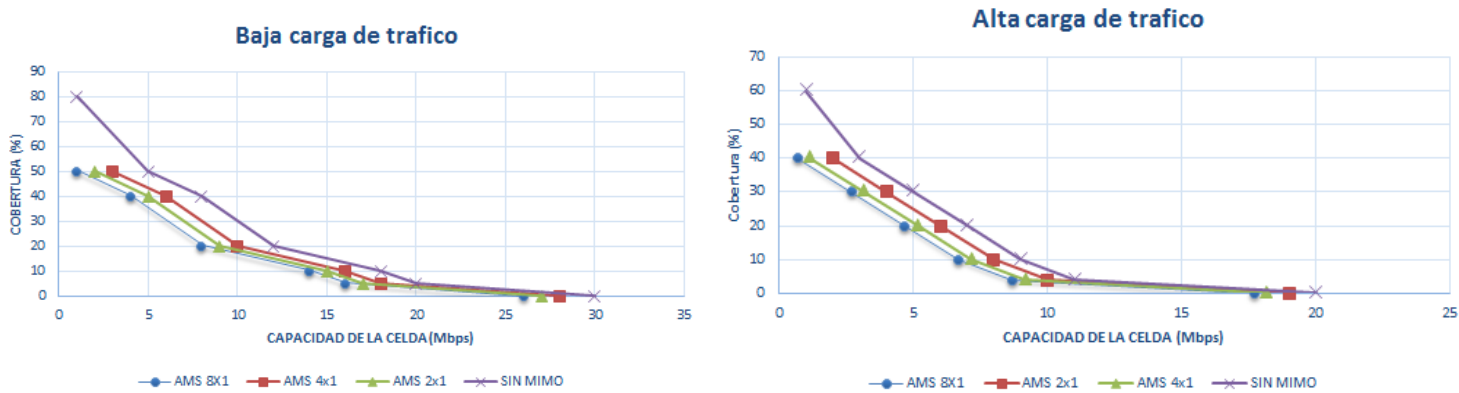


Figura 4.13. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado transmisor

De acuerdo a lo que se muestra en la Figura 4.12 el throughput promedio de la red presenta un mejor desempeño cuando se incrementa el número de antenas en los equipos de recepción, aproximadamente aumenta 10 Mbps en comparación con la configuración 1x1.

Al comparar los resultados de la Figura 4.12 con las de la Figura 4.13, se puede observar que el throughput de la red es mejor en los escenarios en donde se incrementa el número de antenas en el lado del receptor, al contrario cuando se realiza las mismas modificaciones en el lado del transmisor. Este efecto se debe a que AMS, combina las técnicas de Diversidad y Multiplexación espacial, los cuales como se explicó en sus respectivos análisis tienden a disminuir la capacidad de la red, debido a la interferencia que ocasiona el incremento del lado del transmisor, las celdas vecinas y la interferencia que se genera por los usuarios.

También se puede observar que en la Figura 4.13, existe un mejor desempeño de la capacidad en el sistema sin MIMO, con respecto a las otras técnicas de AMS, lo que respalda la teoría de que el incremento de antenas en el lado del receptor reduce la capacidad del sistema.

#### **4.4.3. Análisis de capacidad**

Como se puede observar en la Figura 4.14, empleando la técnica de AMS en escenarios de bajo tráfico donde se incrementa el número de antenas del lado del receptor, se obtiene un mejor desempeño en la capacidad de la red, debido a que el UE obtiene una señal más robusta en cuanto al enlace descendente. De igual manera se puede observar en la Figura 4.15, el efecto que se origina cuando se disminuye el número de antenas del lado del transmisor. Existe una mejoría en cuanto a la capacidad de la red, debido a que se reduce la cantidad de interferencias que producen las mismas.

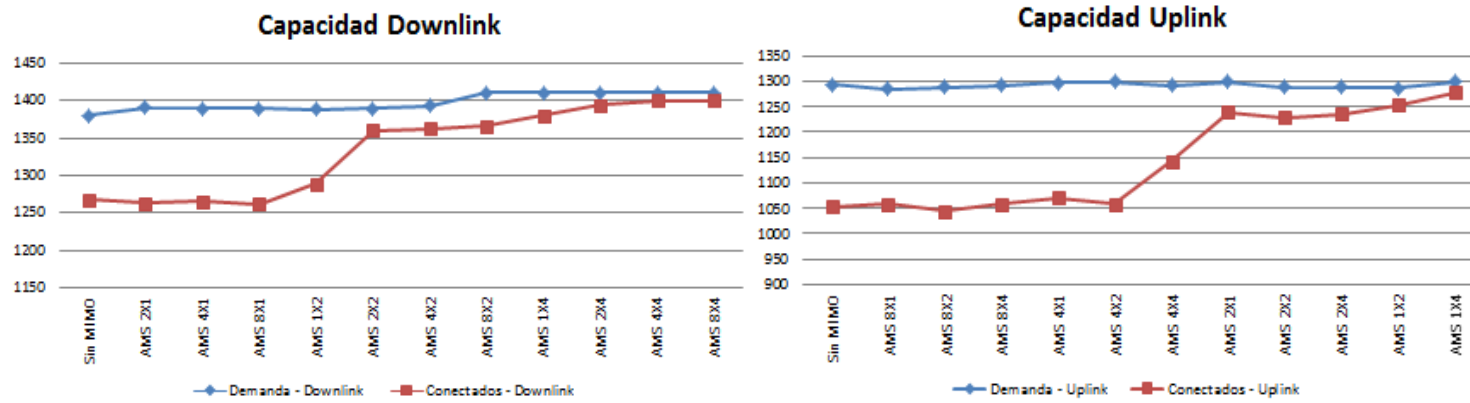


Figura 4.14. Capacidad de la red con bajo tráfico de datos

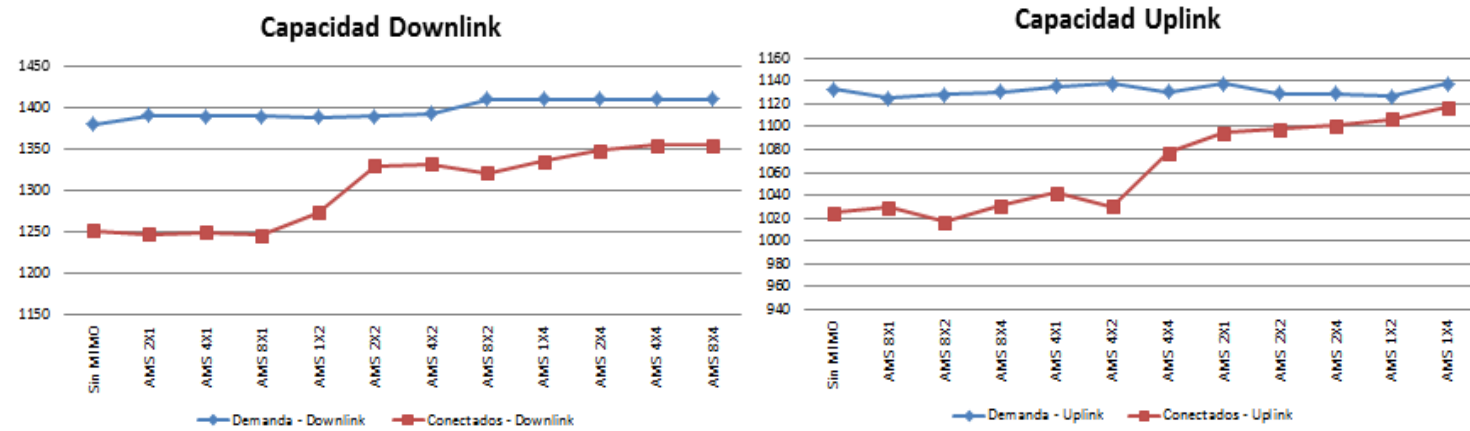


Figura 4.15. Capacidad de la red con alto tráfico de datos



De acuerdo a la evidencia, la técnica AMS tiene un impacto mínimo en la red, debido a que ésta se encuentra limitada por dos razones:

- La limitación de la agregación de las antenas del lado del transmisor, lo que ocasiona que se incremente la interferencia en el sistema, reduciendo las muestras de señales de DRFS que se usan como umbral para que trabaje AMS.
- La definición del umbral de potencia. En caso de que no sea posible seleccionar un nivel adecuado de potencia, se puede fijar el umbral en 1dB, que es similar al usar la técnica de diversidad.

Debido al incremento de la interferencia que ocurre a medida que se incrementa el número de antenas del lado del transmisor, y además de que no se observa un incremento significativo en el comportamiento de la red cuando se agregan antenas en el lado del receptor, no es necesario incluir otras configuraciones de antena (2x2, 4x2, 8x2, 2x4, 4x4 y 8x4) ya que no aportan mayor diferencia para analizar por las consideraciones antes mencionadas.

#### **4.5. Estudio de SU-MIMO**

Como se definió en la Sección 2.6.5, la técnica SU-MIMO permite obtener una alta eficiencia espectral, además de que su característica principal es aumentar la fidelidad y confianza del canal de radio que se asigna al usuario final, lo cual se traduce en un incremento de la capacidad de la red.

Dentro del presente análisis se mantiene el esquema de configuración de las antenas y el escenario base: 20Mhz de ancho de banda con una portadora en 2100 MHz, para posteriormente realizar las comparaciones entre los escenarios de baja y alta demanda de tráfico. En la Tabla 4.8 se observa el resultado de la simulación de la técnica SU-MIMO en un escenario de bajo tráfico, mientras que en la Tabla 4.9 se observa el rendimiento de la red al aplicar esta técnica en un escenario de alta demanda de tráfico.

Tipo de Simulación	SIN SU-MIMO	SU-MIMO 2x1	SU-MIMO 4x1	SU-MIMO 8x1	SU-MIMO 1x2	SU-MIMO 2x2	SU-MIMO 4x2	SU-MIMO 8x2	SU-MIMO 1x4	SU-MIMO 2x4	SU-MIMO 4x4	SU-MIMO 8x4
Total de Usuarios	2672.6	2272.2	2324.5	2426.4	2123.8	2236.9	2435.1	2284.2	23852	2265.7	2152.3	2265.3
Demanda - Downlink	1288.2	1093.4	1112.3	1161.3	1005.8	1063.4	1171.8	1012.4	11551.6	1090.5	1038.3	1101.8
Conectados - Downlink	1136.6	963.6	981.8	1026.9	892.5	970.1	1035.1	895.7	10276.3	964.7	917.4	975.9
Demanda – Uplink	1208.5	1232.6	1075.1	1173.4	921.7	1040.6	1127.9	941.8	11334.5	1002.1	968.1	476.4
Conectados - Uplink	1187.3	1210.9	1056.2	1152.7	905.5	1022.3	1108.1	925.2	11135.0	984.5	951.1	468.1
Usuarios Rechazados (%)	2.1	1.7	0.9	0.6	1.3	0.8	0.7	0.5	1.1	1.3	1.4	1.2
Sin Servicio	32.1	27.3	27.9	29.1	25.5	26.8	29.2	27.4	286.2	27.2	25.8	27.2
Saturación de Recursos	57.2	48.6	49.7	51.9	45.4	47.9	52.1	48.9	510.4	48.5	46.1	48.5

**Tabla 4.8. Simulación de escenario base (portadora 20MHz y baja carga de tráfico)**

Tipo de Simulación	SIN SU-MIMO	SU-MIMO 2x1	SU-MIMO 4x1	SU-MIMO 8x1	SU-MIMO 1x2	SU-MIMO 2x2	SU-MIMO 4x2	SU-MIMO 8x2	SU-MIMO 1x4	SU-MIMO 2x4	SU-MIMO 4x4	SU-MIMO 8x4
Total de Usuarios	2440.38	2074.5	2122.3	2215.3	1939	2042.3	2223.2	2085.5	21777	2068.5	1965	2068.2
Demanda - Downlink	1176.1	998.3	1015.5	1060.2	918.3	970.9	1069.8	924.3	10546.6	995.6	947.9	1006.0
Conectados - Downlink	1037.7	879.8	896.4	937.6	814.8	885.7	945.1	817.8	9382.2	880.8	837.6	891.0
Demanda – Uplink	1103.4	1125.4	981.5	1071.3	841.5	950.1	1029.8	859.8	10348.4	914.9	883.9	435.0
Conectados - Uplink	1084.0	1105.6	964.3	1052.4	826.7	933.3	1011.7	844.7	10166.3	898.8	868.3	427.3
Usuarios Rechazados (%)	3.3	2.1	1.2	0.9	1.9	1.3	1.4	0.8	2.2	2.5	2.7	2.6
Sin Servicio	58.6	37.3	34.6	28.7	25.6	37.8	38.7	28.6	522.6	53.8	48.5	44.6
Saturación de Recursos	70.5	48.1	47.6	52.3	47.6	55.1	61.0	59.5	597.2	49.6	56.8	52.6

**Tabla 4.9. Simulación de escenario comparativo (portadora 20MHz y alta carga de tráfico)**

#### 4.5.1. Análisis de cobertura

De acuerdo a lo que se observa en la Figura 4.16, no existe mayor diferencia en los niveles de cobertura que se presentan en las diferentes configuraciones de SU-MIMO en los escenarios de baja y alta demanda de tráfico. Como se detalló al inicio del presente apartado, SU-MIMO se encuentra enfocado en mejorar la tasa de transmisión de datos, por lo que no se evidencia el incremento de cobertura en la técnica en mención.

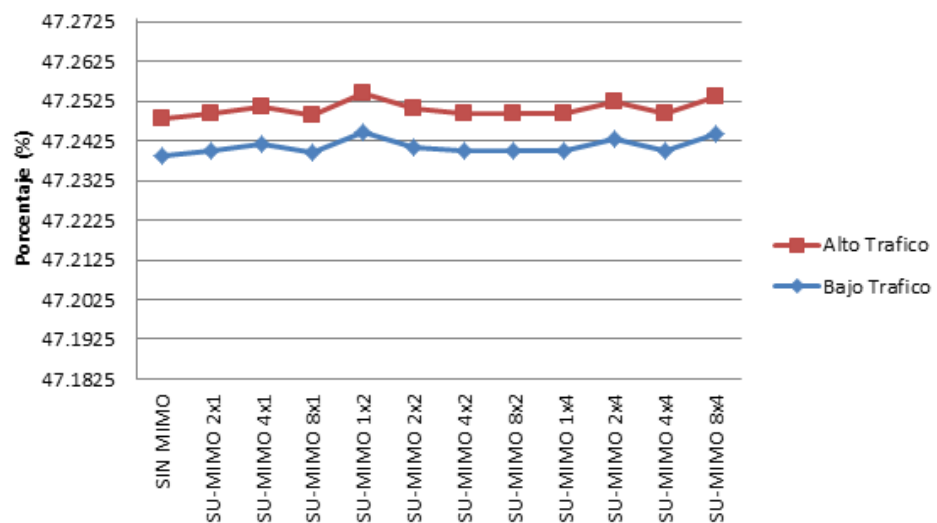


Figura 4.16. Porcentaje de cobertura (RSRP > -90dBm)

#### 4.5.2. Análisis de throughput

En la Figura 4.17, se observa el comportamiento del throughput promedio de la red en relación a la variación de cantidad de antenas en el lado de los equipos de recepción, mientras que en la Figura 4.18 se observa el desempeño del throughput de la red en función del incremento de antenas en el lado del transmisor.

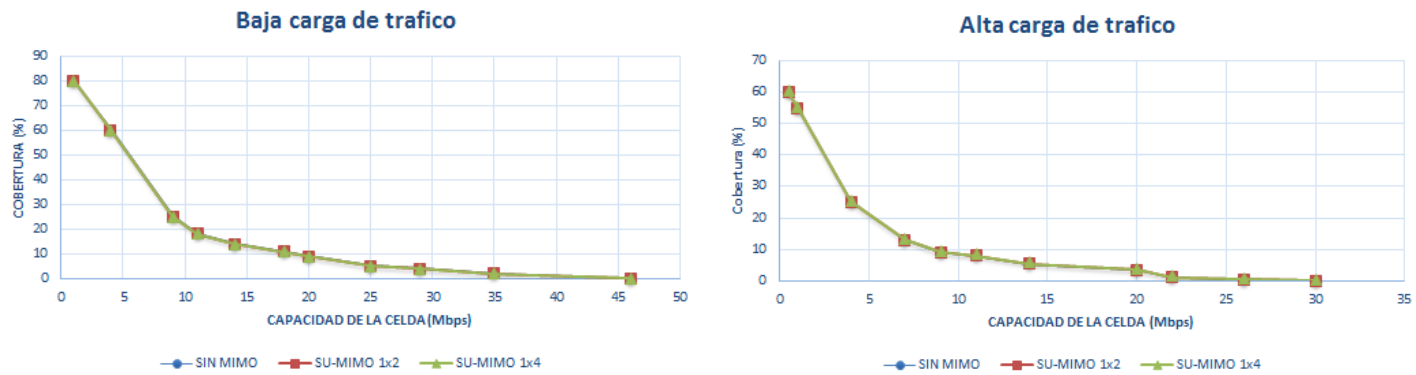


Figura 4.17. Throughput promedio con incremento de antenas en lado receptor

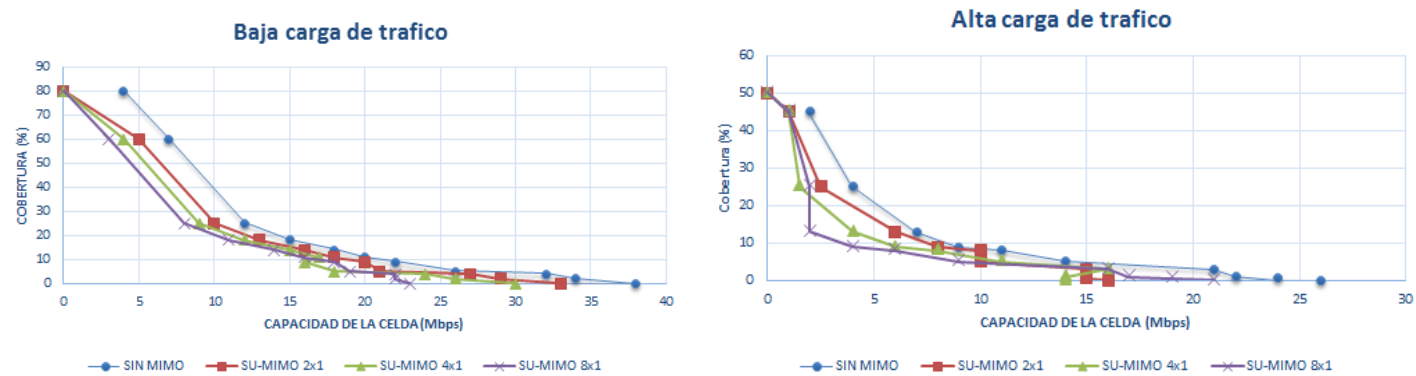


Figura 4.18. Throughput promedio con incremento de antenas en lado transmisor

Como se observa en la Figura 4.17, no existe un notable incremento en el throughput promedio de la red al usar las técnicas de SU-MIMO aumentando el número de antenas en el lado del receptor. Esto se debe a que SU-MIMO se comporta de igual manera como si se tratara de la técnica de Multiplexación espacial, es decir, que el throughput dependa de la calidad de la señal.

En la Figura 4.18, asimismo se observa que el throughput de la red presenta un mejor desempeño en el escenario en el que no se encuentra implementado MIMO. Esto se debe a que SU-MIMO, asigna los recursos de transmisión disponibles a un único usuario, mejorando la percepción de usuario siempre y cuando las condiciones de señal (calidad y cobertura) sean óptimas, además de que la interferencia del sistema es menor en un sistema sin implementación de MIMO, dependiendo del número de antenas que se utilicen en el lado del transmisor.

Esta reducción de la capacidad se puede evidenciar en la Tabla 4.8 y Tabla 4.9, donde se observa que existe una menor cantidad de usuarios conectados en los enlaces descendente y ascendente, respectivamente, debido a que SU-MIMO asigna los recursos disponibles a un único usuario.

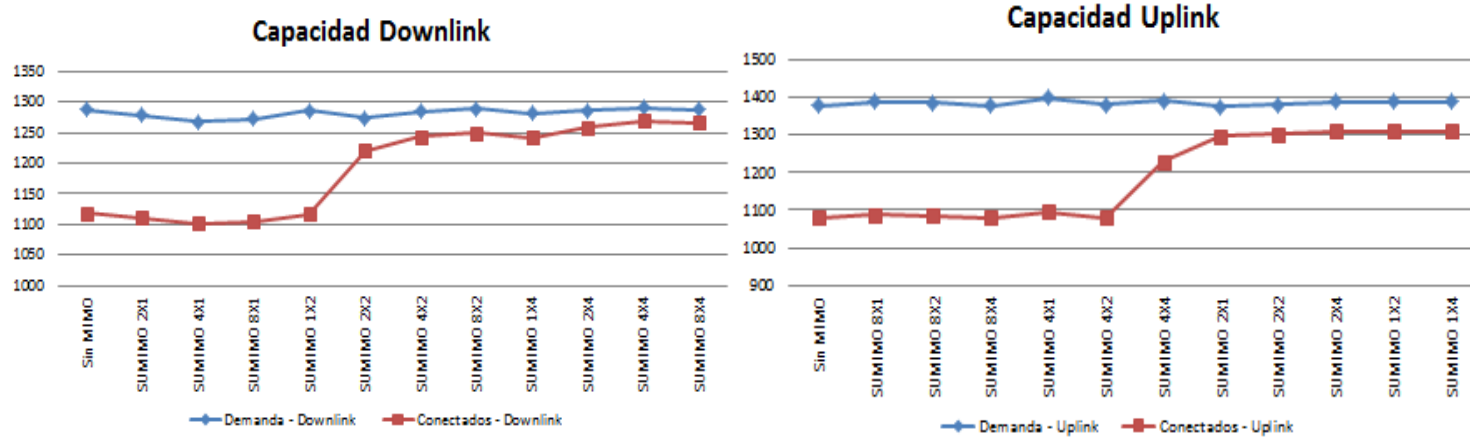


Figura 4.19. Capacidad de la red con bajo tráfico de datos

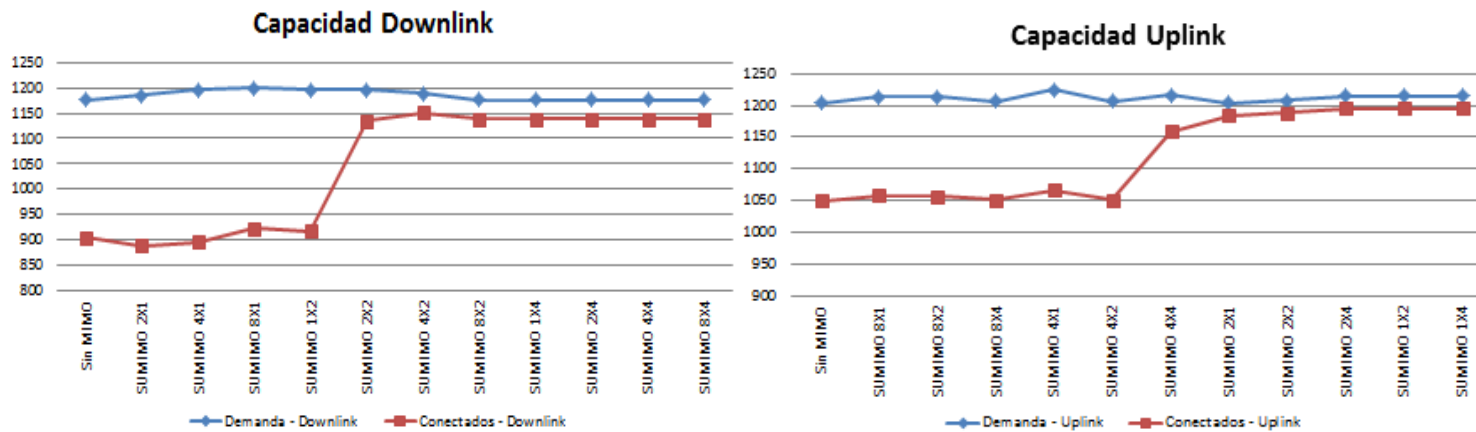


Figura 4.20. Capacidad de la red con alto tráfico de datos

### 4.5.3. Análisis de capacidad

En la Figura 4.19, se observa que el throughput de la red se mantiene sin importar la variación de las antenas en el lado del receptor. Esto se debe al comportamiento SU-MIMO, ya que, al depender de la calidad de señal como la técnica SM (multiplexación espacial, por sus siglas en inglés), ésta se rige al menor número de antenas que se encuentre en la configuración de antenas del transmisor y del receptor. En cuanto al desempeño de la capacidad con respecto a la variación de las antenas en el lado del transmisor y receptor, en la Figura 4.20 se observa que a medida que se aumenta el número de antenas, la capacidad se va incrementando.

Debido al incremento de la interferencia que ocurre a medida que se incrementa el número de antenas del lado del transmisor, y además de que no se observa un incremento significativo en el comportamiento de la red cuando se agregan antenas en el lado del receptor, no es necesario incluir otras configuraciones de antena (2x2, 4x2, 8x2, 2x4, 4x4 y 8x4) ya que no aportan mayor diferencia para analizar por las consideraciones antes mencionadas.

#### 4.6. Estudio de MU-MIMO

MU-MIMO al contrario que SU-MIMO, permite la transmisión y recepción de manera simultánea desde y hacia múltiples usuarios, por medio de técnicas y algoritmos avanzados. Con el uso de MU-MIMO se puede aprovechar al máximo el ancho de banda del canal, así los UEs pueden conseguir altas tasas de velocidad de datos.

En MU-MIMO la transmisión hacia varios terminales se solapa con los mismos recursos de tiempo y frecuencia, aprovechando la diversidad espacial del canal. Con la finalidad de aprovechar las ventajas que tiene MU-MIMO sobre SU-MIMO en cuanto a los modos de transmisión, se debe establecer una considerable separación de los flujos espaciales, para que en el mejor camino exista ortogonalidad en ambos lados, transmisión y recepción.

En este análisis se mantiene el esquema de configuración de las antenas y el escenario base: una portadora en 2100 Mhz, con 20 Mhz de ancho de banda, para posteriormente realizar la comparación entre los escenarios de baja y alta demanda de tráfico.

En la Tabla 4.10 se observa el comportamiento del desempeño de la red, con la aplicación de los diversos modos de operación de la técnica MU-MIMO en un escenario de bajo tráfico. De igual manera en la Tabla 4.11 se visualiza el comportamiento de la red en un escenario de alta demanda de tráfico para cada configuración posible dentro de la técnica de MU-MIMO. ATOLL considera la técnica MU-MIMO solo para el enlace ascendente. Por lo que los resultados de los análisis que se presentan, corresponden a este enlace.



Tipo de Simulación	SIN MU-MIMO	MU-MIMO 2x1	MU-MIMO 4x1	MU-MIMO 8x1	MU-MIMO 1x2	MU-MIMO 2x2	MU-MIMO 4x2	MU-MIMO 8x2	MU-MIMO 1x4	MU-MIMO 2x4	MU-MIMO 4x4	MU-MIMO 8x4
Total de Usuarios	2621.8	2689.2	2638.5	2623.7	2653.8	2735.3	2584.5	2768.5	2735.7	2634.7	2712.5	2689.2
Demanda - Downlink	1263.7	1294.0	1262.5	1255.7	1256.8	1300.4	1243.7	1227.0	1324.9	1268.1	1308.5	1308.0
Conectados - Downlink	1115.0	1140.4	1114.4	1110.4	1115.2	1186.3	1098.7	1085.6	1178.6	1121.9	1156.2	1158.5
Demanda – Uplink	1185.6	1209.2	1220.3	1268.8	1151.7	1272.5	1197.1	1141.4	1300.0	1165.3	1220.1	565.6
Conectados - Uplink	1164.7	1187.9	1198.8	1246.5	1131.5	1250.1	1176.1	1121.3	1277.1	1144.8	1198.6	555.6
Usuarios Rechazados (%)	2.1	1.7	0.9	0.6	1.3	0.8	0.7	0.5	1.1	1.3	1.4	1.2
Sin Servicio	31.5	32.3	31.7	31.5	31.8	32.8	31.0	33.2	32.8	31.6	32.5	32.3
Saturación de Recursos	56.1	57.5	56.5	56.1	56.8	58.5	55.3	59.2	58.5	56.4	58.0	57.5

**Tabla 4.10. Simulación de escenario base (portadora 20MHz y baja carga de tráfico)**

Tipo de Simulación	SIN MU-MIMO	MU-MIMO 2x1	MU-MIMO 4x1	MU-MIMO 8x1	MU-MIMO 1x2	MU-MIMO 2x2	MU-MIMO 4x2	MU-MIMO 8x2	MU-MIMO 1x4	MU-MIMO 2x4	MU-MIMO 4x4	MU-MIMO 8x4
Total de Usuarios	2393.70	2455.2	2409	2395.4	2422.9	2497.3	2359.6	2527.6	2497.7	2405.5	2476.5	2455.2
Demanda - Downlink	1153.8	1181.5	1152.7	1146.5	1147.5	1187.2	1135.5	1120.2	1209.6	1157.8	1194.7	1194.2
Conectados - Downlink	1018.0	1041.2	1017.5	1013.8	1018.2	1083.1	1003.1	991.2	1076.1	1024.3	1055.6	1057.7
Demanda – Uplink	1082.4	1104.0	1114.1	1158.4	1051.5	1161.8	1093.0	1042.1	1186.9	1063.9	1113.9	516.4
Conectados - Uplink	1063.4	1084.5	1094.5	1138.0	1033.0	1141.3	1073.8	1023.8	1166.0	1045.2	1094.3	507.3
Usuarios Rechazados (%)	3.3	2.1	1.2	0.9	1.9	1.3	1.4	0.8	2.2	2.5	2.7	2.6
Sin Servicio	57.4	44.2	39.3	31.0	32.0	46.2	41.1	34.6	59.9	62.5	61.2	52.9
Saturación de Recursos	69.2	57.0	54.1	56.5	59.4	67.4	64.8	72.1	68.5	57.7	71.6	62.4

**Tabla 4.11. Simulación de escenario comparativo (portadora 20MHz y alta carga de tráfico)**

#### 4.6.1. Análisis de cobertura

Según se observa en la Figura 4.21, la diferencia en porcentaje de cobertura en escenarios de alta y baja demanda de tráfico para cada una de las configuraciones de antena estudiadas no es considerable. Esto se debe a que MU-MIMO se encuentra orientado a mejorar las tasas de transferencia de datos, consiguiendo de esta manera obtener una alta eficiencia espectral.

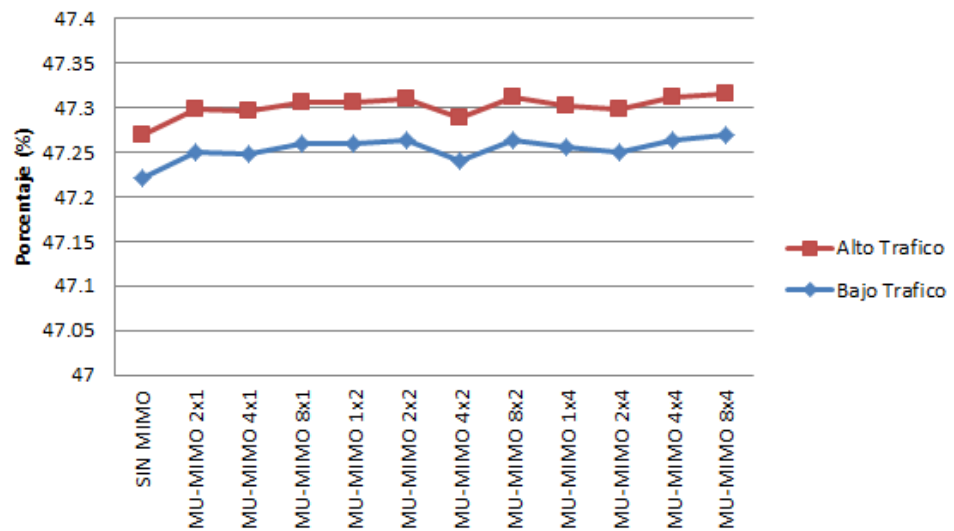


Figura 4.21. Porcentaje de cobertura (RSRP > -90dBm)

#### 4.6.2. Análisis de throughput

En la Figura 4.22, se puede observar el desempeño del throughput promedio de la red con respecto a la variación de la cantidad de antenas en el lado del receptor en los escenarios de baja y alta demanda de tráfico. De igual manera, en la Figura 4.23 se puede visualizar el desempeño del throughput de la red en función de la variación de las antenas en el lado del transmisor en los escenarios de baja y alta demanda de tráfico.

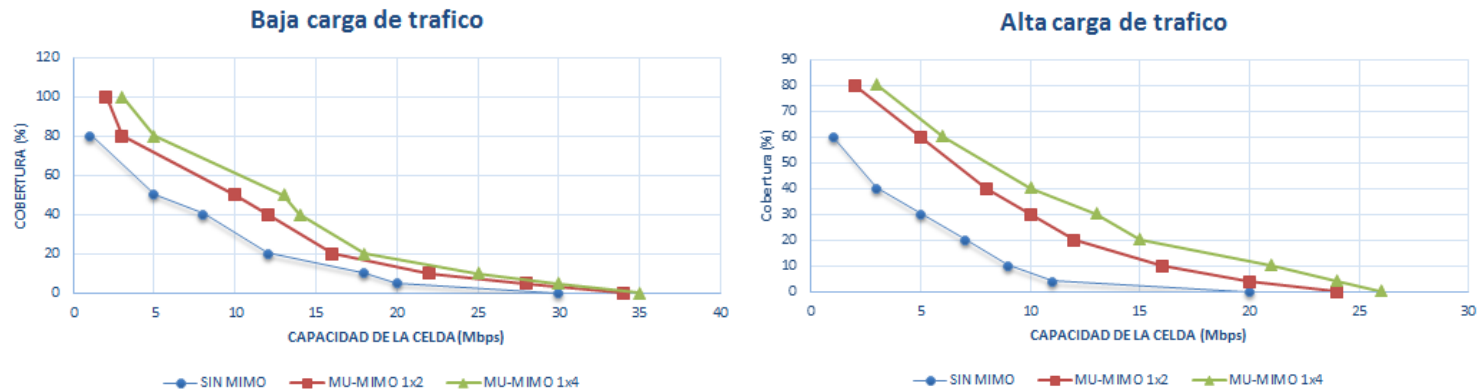


Figura 4.22. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado receptor

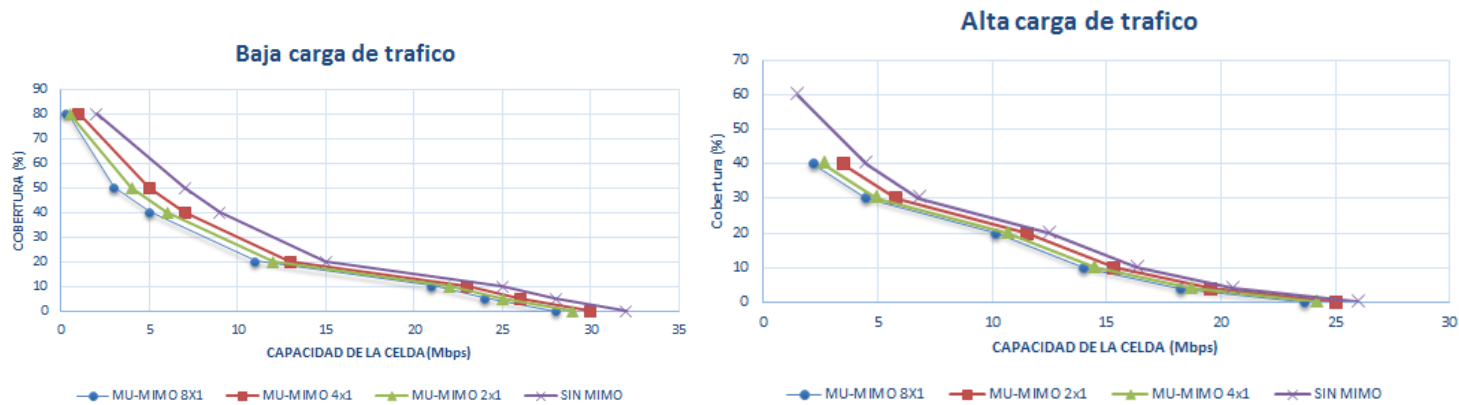


Figura 4.23. Throughput promedio de la red con incremento de antenas en lado transmisor

En la Figura 4.22 se puede observar que existe un incremento de la capacidad en el enlace ascendente de aproximadamente de 15 Mbps para los UE que se encuentren cerca del transmisor en un escenario de bajo tráfico y la variación de las antenas en el lado de los equipos de recepción. En el caso de una alta demanda de tráfico, se observa que la mejoría de la capacidad es de 5 Mbps con la configuración de MU-MIMO 1x4.

De igual manera, en la Figura 4.23, se observa el desempeño del throughput de la red en el enlace ascendente con las respectivas variaciones de la cantidad de antenas en el transmisor. Se observa también que el throughput de la red tiene un mejor desempeño en la configuración donde no se emplea MU-MIMO, esto se debe a la relación del número de antenas y su incidencia en el aumento de la interferencia dentro del sistema. Adicionalmente con una configuración MU-MIMO 8x1 existe una reducción de 8 Mbps para los UE que se encuentren en la cercanía del eNB. La disminución del throughput del enlace ascendente en las configuraciones de MU-MIMO, donde se varía la cantidad de antenas del lado del transmisor, se debe a la mala calidad de la señal que se debe presentar en el canal de radio asignado al UE y que se puede visualizar en la Figura 4.24.

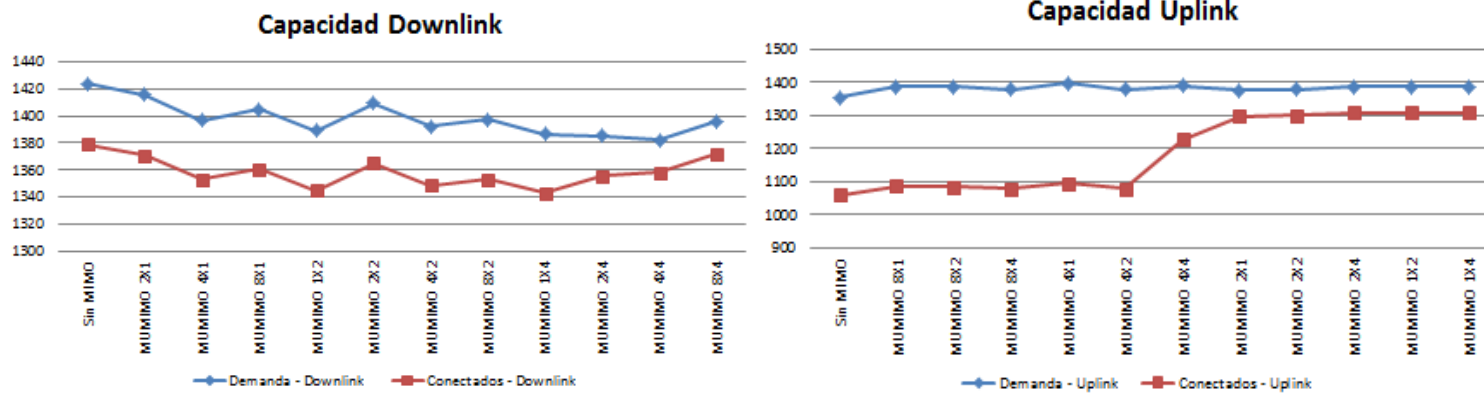


Figura 4.24. Capacidad de la red con bajo tráfico de datos

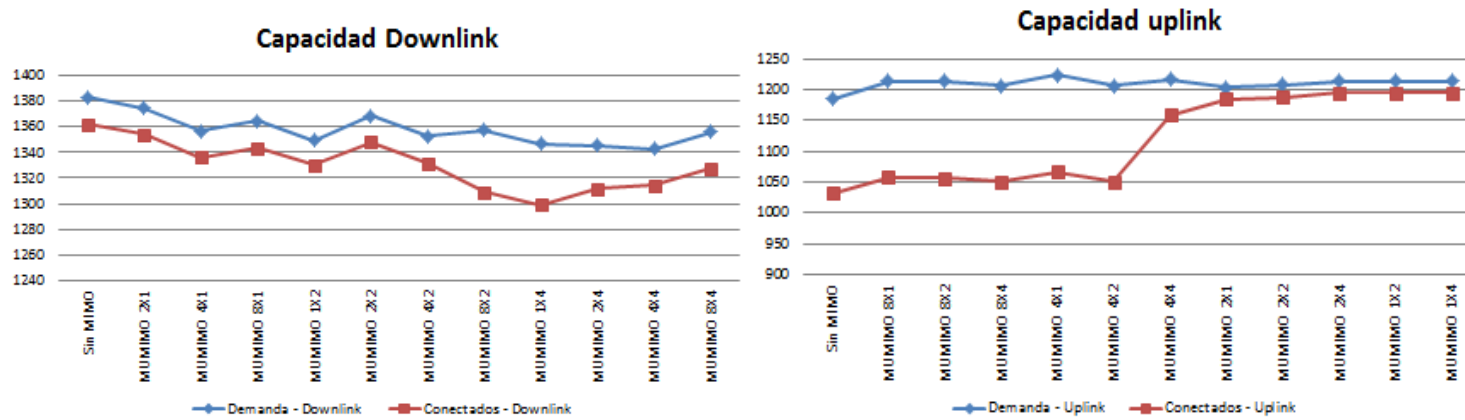


Figura 4.25. Capacidad de la red con alto tráfico de datos

### 4.6.3. Análisis de capacidad

En la Figura 4.24 se puede observar el throughput del enlace ascendente (PUSCH), en función del incremento de las antenas del lado del UE. Se observa que existe un aumento de la capacidad de la red a medida que se va reduciendo la cantidad de antenas en el lado del transmisor, debido a que se reduce la interferencia ocasionada por los sectores de la estación base y de los otros eNBs adyacentes.

Tanto en la Figura 4.24 como en la Figura 4.25 no se observa mayores incrementos en cuanto a la capacidad del enlace descendente, debido a que la técnica MU-MIMO se encuentra orientada a mejorar la calidad.

### 4.7. Estudio de Agregación de segunda portadora

En esta sección se va a analizar el efecto que origina en el desempeño de la red, la agregación de una portadora adicional en una red LTE, por lo que se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones que son importantes dentro de este estudio:

- Se mantiene la misma configuración física del sistema radiante (azimut, Tilt mecánico, Tilt eléctrico) a excepción del modelo de antena, debido a que se necesita usar una antena de doble banda para realizar el estudio de la agregación de la segunda portadora.
- Se utiliza una portadora en la banda de 700 Mhz (en la Tabla 3.3 se describen sus propiedades)
- Los resultados presentados corresponden a la interacción de las bandas trabajando de manera simultánea, que se contrarrestan con los resultados de la operación de la banda de 2100 Mhz.
- Se mantiene el número de 10 iteraciones en la Simulación de Monte Carlo, debido a que no se observa que exista una diferencia notoria en los resultados

posteriores a la simulación incrementando el número de iteraciones, como sucedió en estudios predecesores.

En la Tabla 4.12, se observan los resultados del desempeño de la red con una baja demanda de tráfico y la agregación de una segunda portadora en la banda de 700 Mhz. De manera similar en la Tabla 4.13 se aprecia el rendimiento de la red con una alta demanda de tráfico con la agregación de la portadora adicional.

<b>Tipo de Simulación</b>	<b>UNA PORTADORA (2100 Mhz)</b>	<b>DOS PORTADORAS (700 Mhz/ 2100 Mhz)</b>
Total de Usuarios	2852.8	3421.1
Demanda - Downlink	1375.0	1646.2
Conectados - Downlink	1213.2	1450.8
Demanda - Uplink	1290.0	1315.7
Conectados - Uplink	1073.8	1103.5
Usuarios Rechazados (%)	2.1	0.35
Sin Servicio	34.2	10.2
Saturación de Recursos	61.0	21.4

**Tabla 4.12. Simulación de agregación de portadora - con bajo trafico**

<b>Tipo de Simulación</b>	<b>UNA PORTADORA (2100 Mhz)</b>	<b>DOS PORTADORAS (700 Mhz/ 2100 Mhz)</b>
Total de Usuarios	2751.2	3213.1
Demanda - Downlink	1326.1	1546.1
Conectados - Downlink	1170.0	1362.6
Demanda - Uplink	1244.1	1268.9
Conectados - Uplink	1035.6	1064.2
Usuarios Rechazados (%)	3.3	1.87
Sin Servicio	66.0	37.8
Saturación de Recursos	79.5	34.1

**Tabla 4.13. Simulación de agregación de portadora - con alto trafico**

#### 4.7.1. Análisis de cobertura

Como se observa en la Tabla 4.12 y Tabla 4.13, hay un mejor desempeño la red que posee dos portadoras, tanto en escenarios de baja como en alta

demanda de tráfico, debido a que se tiene más disponibilidad de recursos que pueden ser asignados a los usuarios nuevos y actuales. Esto hace que a nivel de calidad y disponibilidad de servicio se incremente de manera positiva la percepción de calidad por parte del usuario.



**Figura 4.26. Porcentaje de cobertura (RSRP > -90dBm)**

Como se observa en la Figura 4.26, los niveles de intensidad de señal se incrementan de manera significativa en una red que mantiene configurada dos portadoras y las mantiene operativas de manera simultánea. Esto se debe en primera instancia a las características que posee la banda de 700 Mhz, ya que ésta tiene un mayor alcance debido a su longitud de onda  $\lambda = \frac{v}{f}$ , donde:

$\lambda$ : Longitud de onda.

v: velocidad de la onda

f: frecuencia de la onda.

De acuerdo a la ecuación de longitud de onda, entre más alta sea la frecuencia de la onda, menor será la longitud de la onda. Interpolando esta

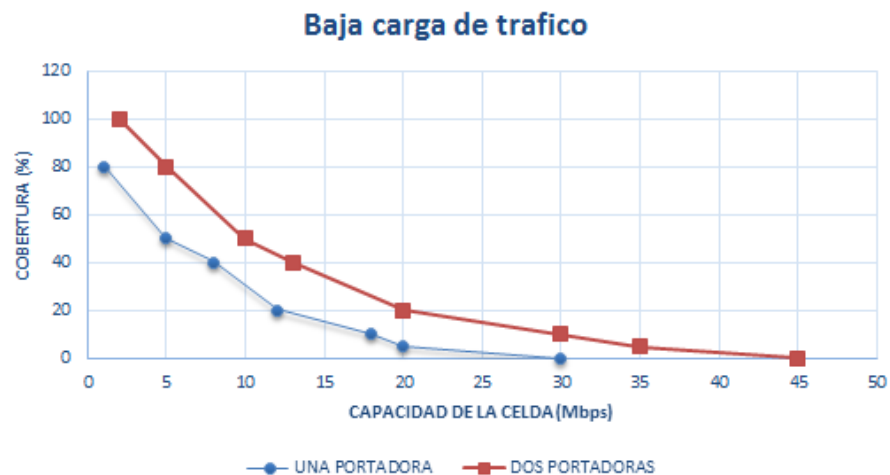


definición a niveles de cobertura, se tienen rangos mayores de distancia de cobertura con los mismos niveles en la banda de 700 Mhz, que utilizando una portadora de 2100 Mhz.

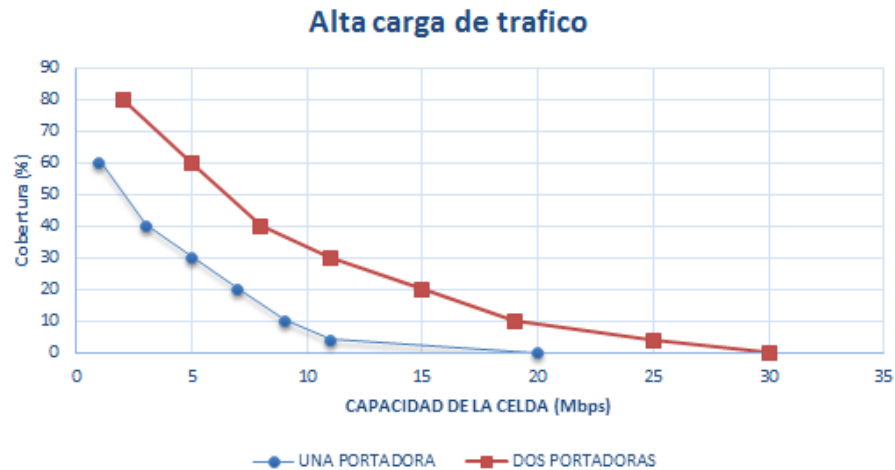
Además es importante indicar que a medida que se incrementa la frecuencia de la onda, ésta se vuelve más sensible al efecto de la reflexión, lo cual influye de manera significativa en la capacidad de penetración de una onda por diferentes medios, esto es, una onda de menor frecuencia puede penetrar obstrucciones (edificaciones o construcciones) con más facilidad que una de mayor frecuencia, razón por la cual se observa el incremento de los niveles de cobertura en el caso de la agregación de la segunda portadora.

#### 4.7.2. Análisis de throughput

El incremento de los niveles de cobertura se ve reflejado además en el throughput de la red, tal como se aprecia en la **Error! Reference source not found.**, en donde éste aumenta alrededor de 15 Mbps para los UE que se encuentran cerca del transmisor en un escenario de bajo tráfico, mientras que en la Figura 4.28 se observa un incremento de 10Mbps, en escenarios de alto tráfico.



**Figura 4.27. Throughput promedio con agregación de una portadora en baja tráfico de datos**



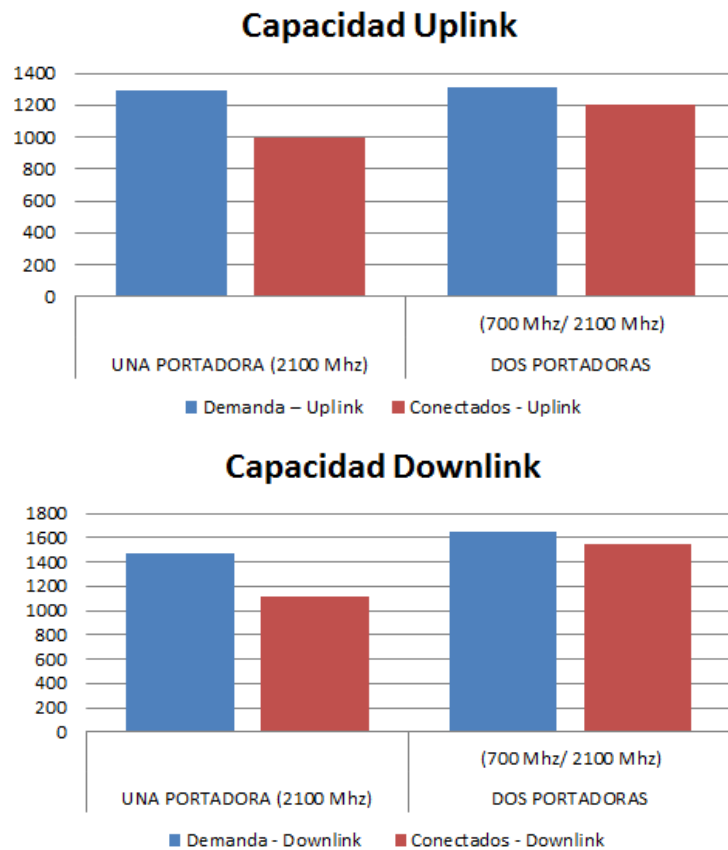
**Figura 4.28. Throughput promedio con agregación de una portadora en alto tráfico de datos**

#### 4.7.3. Análisis de capacidad

Como se puede apreciar en la Figura 4.29, la capacidad de la red bajo escenarios de alta carga de tráfico y con agregación de una portadora adicional tiene un mejor desempeño con respecto a una red que solo contiene una portadora asignada; esto se debe a la cantidad de recursos que se pueden asignar a los usuarios, la mejoría notoria de la cobertura y el uso de la banda de los 700 MHz, que brinda mejores características de difracción y penetración, permitiendo que la red obtenga mayor número de usuarios conectados en enlace descendente como en el ascendente.

La agregación de una portadora adicional a la red LTE, resulta crear un efecto positivo en cuanto al desempeño de la red. Es importante destacar que se puede conseguir una mayor ventaja en cuanto a la agregación de

portadoras, si se realiza un correcto control de propagación en las celdas que tenga la portadora de 700 Mhz, debido a que como tienen más distancias de cobertura, una sobre-propagación de esas celdas puede ocasionar altos niveles de interferencia en el sistema, lo que conllevaría a tener bajos niveles de calidad de señal, reducida cobertura pero buenos niveles de intensidad de señal.



**Figura 4.29. Capacidad de las celdas con agregación de una portadora**

#### **4.8. Consideraciones para la implantación**

La red de evolución de largo término LTE, está concebida para que sea la respuesta ante el incremento de las necesidades del usuario de acceder a redes más rápidas, y utilizar servicios que cumplan sus expectativas; además de ofrecer a las operadoras, una salida ante la saturación de la infraestructura actual que las obliga a realizar grandes inversiones en capacidad y mejoras tecnológicas para atender un mercado cada vez más exigente.

Según datos de la ARCOTEL, LTE en Ecuador es una tecnología que está funcionando desde el 2014 [45] y cuya maduración se verá en los próximos años, acompañado de las limitaciones de espectro y crecimiento del tráfico de datos, que son las limitaciones más acentuadas por el desarrollo de los teléfonos inteligentes, nuevos servicios de video móvil, tecnología de alta definición o el internet de las cosas.

La calidad de servicio que ofrece un operador de telecomunicaciones a sus clientes depende, en gran medida, de la capacidad y la extensión de la red desplegada. En el caso concreto de la telefonía móvil, con el fin de prestar el mejor servicio posible a sus suscriptores, los operadores realizan una planificación de radio que permita maximizar la capacidad y cobertura de la red con el espectro que disponen, haciendo que los beneficios de la explotación de un bien público se reviertan hacia los ciudadanos en forma de una mejor calidad y una mayor oferta de servicios móviles.

Debido a las condiciones macroeconómicas del país y la desaceleración de la inversión privada en infraestructura tecnológica, las empresas de telecomunicaciones tienden a la implementación de redes LTE sobre tecnologías existentes 2G y 3G. Es así que, por ejemplo, la empresa pública CNT EP realiza la implementación de LTE en su red, instalando esta tecnología sobre redes UMTS y de HSPA+.

#### **4.8.1. Análisis de Indicadores de calidad (Accesibilidad y Throughput)**

La evolución de los sistemas de telefonía de redes móviles ha originado que los abonados utilicen los servicios de comunicación que los operadores de telefonía celular ofrecen, y poder así satisfacer sus necesidades de llamadas, conexión, entretenimiento, comercial, entre otras. La demanda del acceso a estos servicios debe impulsar el crecimiento y evolución de los sistemas de telefonía celular de banda ancha capaces de ofrecer QoS de extremo a extremo para soportar los diferentes tipos de tráfico que circulan por la red [46].

La monitorización periódica de una red de telecomunicaciones se lo realiza actualmente por medio de KPIs (indicadores clave de rendimiento, por sus siglas en inglés). Los KPIs son indicadores básicos de calidad y rendimiento que permiten observar el desempeño de una red y contrarrestar con las mediciones realizadas en campo [47]. Los KPIs se pueden emplear en las siguientes tareas:

- Para observar, controlar y optimizar los recursos de radio con la finalidad de mejorar el QoS y la percepción de servicio del usuario final. Además de aprovechar de mejor manera los recursos disponibles de radio.
- Para detectar de manera rápida y precisa los problemas que pueden existir para que el operador tome las acciones correctivas del caso, mitigando al máximo las interrupciones o la mala calidad del servicio.
- Para observar si se cumplen con los objetivos de cumplimiento; de esta manera se puede garantizar la calidad del servicio que ofrecido al abonado.

Hay un tipo especial de KPIs que son los de accesibilidad que se emplean para medir la probabilidad de acceso a los servicios solicitados por un usuario, dentro de las tolerancias especificadas en la condiciones de servicio [48].

Para observar los KPIs de accesibilidad se debe tener las siguientes consideraciones:

- El servicio prestado por la E-UTRAN se define como E-RAB (Servicio Portador de Acceso Radio a E-UTRAN, por sus siglas en inglés)
- El acceso hacia la red se define como RRC (Control de Recursos de radio, por sus siglas en inglés).
- El RRC y el E-RAB, son los principales indicadores dentro de los KPIs de accesibilidad.

La definición de los KPIs de accesibilidad se muestra en la Tabla 4.14. Estos indicadores deben ser mayores al 98%, para garantizar la disponibilidad de servicio y acceso a la red.

Indicador (KPI)	Definición
<i>Tasa de Servicio del RRC</i>	$RRC\ SR = \frac{RRC\ CONNECTION\ SUCCESS}{RRC\ CONNECTION\ ATTEMPT} \times 100$ , donde: <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>RRC Connection Success.</i>- es el número de conexiones RRC exitosas.</li> <li>- <i>RRC Connection Attempt.</i>- es el número de intentos de conexión RRC.</li> </ul>
<i>Tasa de Servicio del E-RAB</i>	$ERAB\ SR = \frac{ERAB\ SETUP\ SUCCESS}{ERAB\ SETUP\ ATTEMPT} \times 100$ , donde: <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>ERAB Setup Sucess.</i>- es el número de conexiones de E-RAB exitosas.</li> <li>- <i>ERAB Setup Attempt.</i>- es el número de intentos de conexión E-RAB.</li> </ul>

**Tabla 4.14. KPIs de accesibilidad**

Los KPIs de Throughput, son de las principales métricas que caracterizan a la tecnología de radio de LTE. Ésta nos indica la velocidad de datos que se ofrece a los UE en las diferentes condiciones de los canales de radio. La tasa de throughput que se asigna a un UE puede expresarse en función del número total de usuarios activos que se encuentren en la red y la cantidad de tráfico que puede manejar la celda [49].

Los factores que pueden incidir en la tasa de throughput que se ofrece al UE son las siguientes:

- Las condiciones del canal de radio (calidad e intensidad de señal)
- El tipo de antena que se usa en el transmisor
- El ancho de banda de la transmisión del eNB
- La ubicación del UE

Los principales indicadores de throughput para los enlaces descendente y ascendente, respectivamente son los siguientes:

- DLAverageThroughput\_QCI (Kbit/s)
- ULAverageThroughput\_QCI (Kbit/s)

Estos indicadores de tasa de transferencia deben estar de acorde a las tasas de velocidad de datos establecidos por el estándar LTE.

#### **4.8.2. Estimación de la demanda por aplicación tecnológica**

A finales de 2014, la mitad de la población mundial tenía al menos una suscripción móvil, por un total de más de 3,6 millones de abonados móviles únicos. En 2020, alrededor de las tres quintas partes de la población mundial tendrá una suscripción de telefonía móvil, con cerca de mil millones de nuevos suscriptores añadido durante el período [3].

GSMA (Asociación del Grupo Especial Móvil, por sus siglas en francés) en su reporte de Economía Móvil de 2015, indica que el crecimiento de redes LTE

llegó en 2014 a 335 redes implementadas en 118 países. Actualmente alcanza al 26% de la población mundial, aunque haya una marcada diferencia con los mercados desarrollados, alcanzando el 90% de cobertura en estos mercados y 15% en los mercados en desarrollo [3].

De acuerdo al reporte de movilidad de la compañía de telecomunicaciones Ericsson, el total de suscripciones en el primer trimestre del 2016 fue de alrededor de 7.400 millones, las suscripciones totales de LTE llegan a 1.200 millones en todo el mundo, y en el primer trimestre de 2016, hubo 150 millones de nuevas suscripciones mientras que en WCDMA/HSPA llegó a alrededor de 30 millones [2].

La comunicación de banda ancha se ha convertido en un elemento fundamental para la economía y la sociedad ya que ha revolucionado no solo la forma en que la gente trabaja, sino también su forma de vida; ha permitido el desarrollo de aplicaciones como el internet móvil en donde todos los agentes involucrados en el sector de las telecomunicaciones, medios de comunicación, y la industria tecnológica en general están maniobrando para capturar las oportunidades que brinda esta nueva realidad.

La asequibilidad y equidad de banda ancha proporciona beneficios económicos y una serie de oportunidades para mejorar el bienestar social: en salud, educación y medio ambiente. Hay un acelerado cambio tecnológico hacia redes móviles de banda ancha en todo el mundo. Las conexiones de banda ancha móvil, que implican tecnologías de tercera y cuarta generación, solo eran el 40% del total de conexiones a finales de 2014, pero en 2020 se incrementará a casi el 70% del total de conexiones. Esta migración está siendo impulsada por una mayor disponibilidad y accesibilidad de los teléfonos inteligentes y coberturas de red más amplias.

En el Ecuador, hay tres operadoras de telefonía móvil que prestan este servicio: CONECEL a través de su marca comercial CLARO, subsidiaria de



América Móvil, OTECEL, con su marca comercial MOVISTAR, subsidiaria de Telefónica de España y la empresa pública CNT EP. Según datos de la ARCOTEL y de acuerdo a la Tabla 4.15, a junio de 2016 habían un poco más de 14.5 millones de líneas activas entre las tres operadoras con una densidad nacional de líneas del 88,64%.

MES/AÑO	TOTAL CONECEL	TOTAL OTECEL	TOTAL CNT EP	TOTAL	POBLACIÓN NACIONAL	DENSIDAD DE LÍNEAS ACTIVAS
2008	8.156.359	3.211.922	323.967	<b>11.692.248</b>	13.805.095	84,70%
2009	9.291.268	3.806.432	356.900	<b>13.454.600</b>	14.005.449	96,07%
2010	10.470.502	4.314.599	333.730	<b>15.118.831</b>	14.483.499	104,39%
2011	11.057.316	4.513.874	303.368	<b>15.874.558</b>	14.765.927	107,51%
2012	11.757.906	5.019.686	309.271	<b>17.086.863</b>	15.520.973	110,09%
2013	12.030.886	5.148.308	362.560	<b>17.541.754</b>	15.774.749	111,20%
2014	11.772.020	5.055.645	776.892	<b>17.604.557</b>	16.027.466	109,84%
2015	8.658.619	4.134.698	1.065.703	<b>13.859.020</b>	16.278.844	85,14%
Jun 2016	8.864.433	4.392.705	1.282.926	<b>14.540.064</b>	16.403.786	88,64%

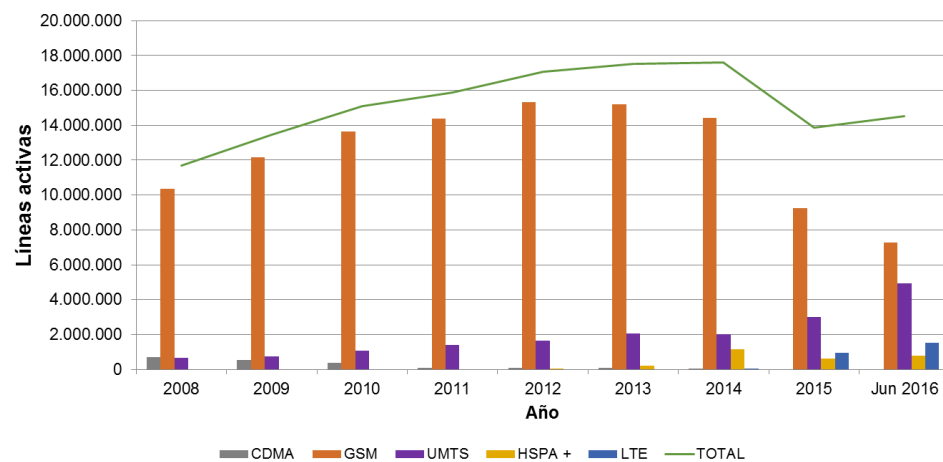
**Tabla 4.15. Número de líneas activas por operador**

El Servicio Móvil Avanzado (SMA), provisto por las operadoras de telefonía móvil en el país ofrece los siguientes de servicios [45]:

- **Servicios de telefonía.**- Línea del SMA donde únicamente se provee el servicio de telefonía para comunicación con cualquier abonado o cliente del servicio de telefonía fija o móvil avanzado.
- **Servicios de telefonía e Internet.**- Línea del SMA donde además del servicio de telefonía, se provee acceso a Internet.
- **Servicio de Internet.**- Línea del SMA donde se provee solo el acceso a internet desde cualquier equipo terminal.

- **Servicio de datos.-** Línea del SMA mediante el cual se realiza el intercambio de datos sin contemplar acceso a Internet o telefonía.

Con respecto a la evolución tecnológica en Ecuador, en la Figura 4.30 se muestra cómo ha ido en aumento el uso de tecnologías 3G y 4G a través del número de líneas activas en UMTS, HSPA y LTE respectivamente en las tres operadoras, siendo GSM, tecnología de 2G, aún predominante en el mercado.



**Figura 4.30. Líneas activas por tecnología**

En el mundo, la migración tecnológica hacia redes de mayor velocidad se da por las inversiones que hacen las operadoras. De acuerdo a GSMA, se estima que 4 de cada 5 personas tendrán acceso a redes 3G en el año 2020, arriba del 70% de la actualidad. Además, el mismo informe destaca que las redes 4G se están implementando a un ritmo más rápido de lo que se hizo con redes 3G. A pesar de que se tomó 10 años para la cobertura de la red 3G para llegar a la mitad de la población mundial, a la red 4G le tomará ocho años alcanzar el mismo hito, es decir para el 2017.

#### **4.8.3. Plan de acción para mejorar los indicadores de calidad**

Para mejorar los indicadores que se utilizan para medir la calidad del servicio brindado, es necesario que la empresa operadora de telefonía móvil pueda contar con un plan de acción u operativo que relacione las actividades a ejecutar con los objetivos propuestos por esta empresa, siempre y cuando estos objetivos estén relacionados con los siguientes factores:

##### **Interferencia y ruido**

Tal como se revisó en la Sección 2.7, las redes LTE emplean esquemas de modulación de alto nivel para obtener óptimo rendimiento, ofreciendo tolerancias inherentemente bajas a la interferencia o ruidos en la señal; esto es que, lo que en 2G o 3G se consideraban niveles aceptables de interferencia externas o PIM (Intermodulación Pasiva, por sus siglas en inglés), en redes LTE pueden paralizar su rendimiento. A medida que la sofisticación y complejidad del sitio aumenta, el margen de error se reduce por lo que cada fuente de interferencia debe anticiparse y mitigarse.

Se puede considerar ruido en sistemas de telecomunicaciones al conjunto de múltiples fuentes de interferencia, generadas por maquinaria eléctrica cercana, equipos de radio o descargas eléctricas causadas por componentes RF conectados inadecuadamente. Incluso en sitios con infraestructura y componentes RF propiamente conectados y con el mantenimiento respectivo, las estaciones base recogen ruido de los sectores adyacentes.

A continuación, se ponen a consideración las siguientes prácticas al momento de implementar redes LTE para mitigar los efectos del ruido:

- Identificar posibles fuentes de ruido (como motores eléctricos, convertidores de energía y otros dispositivos eléctricos cercanos) y asegurar de que estén aterrizados y blindados.

- Evaluar cuidadosamente las emisiones fuera de banda de sitios de transmisores cercanos o adyacentes, luego colocar y apuntar las antenas para maximizar el aislamiento de esas fuentes de ruido.
- Elegir antenas con envolventes de patrón de radiación que minimicen la superposición de los sectores y supriman la cobertura donde no se desee, como los pisos superiores de edificios altos.
- Instalar filtros de mitigación de interferencia en transmisores cercanos para suprimir emisiones fuera de banda que pueden causar ruido.
- Los patrones de antena deben tener una baja relación de potencia de sector para minimizar la duplicación y la supresión alta de lóbulos laterales superiores para minimizar la cobertura en direcciones no deseadas.
- Asegurar que las conexiones coaxiales se ajustan para su torsión específica con el fin de reducir la posibilidad de ruido generado por descargas eléctricas.
- Seguir las prácticas para la correcta puesta a tierra del equipo.
- No exceder los valores de energía de transmisión de cualquier componente en la ruta de la radiofrecuencia.
- Asegurar y proteger el cableado para prevenir la tensión, vibración o daño ambiental.
- Regular la temperatura del equipo permitiendo la máxima circulación del aire en instalando parasoles donde sea necesario, especialmente en climas calientes.

### **Intermodulación pasiva (PIM)**

PIM es la interferencia resultante de la combinación no lineal de dos o más frecuencias en un circuito pasivo. Si la interferencia coincide con frecuencias

de transmisión de una red LTE, puede afectar el rendimiento y la capacidad de la misma. LTE es mucho más sensible a este tipo de interferencias que las tecnologías 2G y 3G. Las posibles fuentes de PIM incluyen malas conexiones, cables dañados o filtraciones de agua, aunque también puede ser causado por objetos fuera de la ruta, tales como postes de luz, ductos enterrados, vallas o material de obra.

A continuación, se ponen a consideración las siguientes prácticas al momento de implementar redes LTE para mitigar los efectos de PIM:

- Verificar que los protocolos de prueba de los proveedores de instalación incluyan revisión de tensión ambiental y prueba de PIM en condiciones estáticas y dinámicas, considerando que en la parte superior de la estructura nada es estático.
- Instalar equipos certificados en PIM con conexiones resistentes al clima, ya que en la actualidad hay muchos dispositivos antiguos como antenas, o diplexores que no fueron diseñados para cumplir los altos estándares PIM de la actualidad.
- Minimizar el número de adaptadores usados en el diseño de la ruta RF.
- Un control completo del sitio puede identificar las fuentes externas potenciales de PIM, como conductos enterrados, estructuras metálicas cercanas u otros problemas. Este tipo de control también puede incluir pruebas y mitigación posterior a la instalación.

### **Construcción del sitio**

La construcción es un proceso complejo que involucra muchas prioridades; en la mayoría de los casos, existen problemas legales y de zonificación a considerar, factores geográficos y topográficos, consideraciones de riesgo y responsabilidad; y, por supuesto, la importancia de ofrecer la cobertura LTE donde se planificó que se debía tener.

A continuación, se ponen a consideración las siguientes prácticas al momento de la construcción de sitios en donde se albergará equipamiento LTE:

- Asegurar que el sitio cumpla con las condiciones geográficas, topográficas y legales para la buena operatividad del eNB. Esto también implica haber cumplido con los permisos y normas de funcionamiento exigidos por los organismos locales.
- Como con cualquier implementación LTE, un nuevo sitio demanda acoplamiento preciso de componentes. Es necesario considerar soluciones de conectividad coaxial e híbrida probado y ensamblado desde la fábrica para reducir errores y tiempos de implementación.
- La conexión eléctrica es esencial al momento de construir un sitio nuevo. Un sitio típico debe contar con una adecuada conexión a tierra en la parte superior e inferior de la torre.

### **Co-ubicaciones**

La co-ubicación, también llamada co-localización, es la práctica de compartir recursos de sitio entre radios de estación base, lo que significa que múltiples tecnologías de acceso, radio y/o elementos de canal comparten espacio en una torre. En algunos casos, incluye múltiples operadores que comparten el mismo equipo de radio y ruta RF, separando los servicios en una unidad de banda base (BBU) o interruptor.

En las co-ubicaciones, las implementaciones de LTE coexisten con tecnologías existentes, por lo que los equipos deben compartir infraestructura de red antigua. Si bien esto ofrece algunas ventajas, como la posibilidad de aprovechar la capacidad de transmisión existente de un sitio, también representa tiempo y costos adicionales ya que el espacio puede ser limitado, además de la posibilidad de la introducción de interferencias producto de las tecnologías adicionales.

A continuación, se ponen a consideración las siguientes prácticas al momento de implementar redes LTE en sitios co-ubicados:

- Elegir componentes diseñados para minimizar la intermodulación pasiva y evaluar minuciosamente este parámetro después de la implementación.
- Para minimizar la interferencia resultante de los componentes co-ubicados, incluir soluciones de combinación y filtrado que previenen interferencia de canal adyacente.
- Antes de la implementación, analizar el panorama RF y asegurar que cualquier posible interferencia que se encuentre, se puedan mitigar.
- Separar las antenas vertical y horizontalmente para evitar que se interfieran con otras.
- Orientar las antenas para que no encuentren obstáculos físicos cerca de sus vigas principales.
- Aislar las antenas de las fuentes potenciales de interferencia externa como barandas, estructuras de soporte, cables de amarre u otros equipos de torre.
- Usar personal de instalación certificado que esté familiarizado con los retos de la co-ubicación.

### **Marco regulatorio**

El rol de los órganos reguladores siempre ha tenido gran relevancia en el desarrollo de cualquier modelo de negocio independiente del producto o servicio de telecomunicaciones. Es importante que los organismos regulatorios desarrollen de políticas que favorezcan la innovación y el desarrollo de nuevos servicios y aplicaciones sobre infraestructuras móviles y que garanticen al mismo tiempo precios más competitivos para los usuarios finales; y lo más importante, el establecimiento de políticas homogéneas que favorezcan el libre mercado.

Es evidente que un recurso fundamental para hacer frente a la creciente demanda de datos en las redes LTE es el espectro de frecuencias. Es por ello que es adecuado resaltar la importancia del posicionamiento de los reguladores regionales acerca de la entrada de posibles competidores, atendiendo a las implicaciones que una postura u otra podría suponer.

El modelo regulatorio ecuatoriano en materia de Telecomunicaciones está enfocado hacia la regulación de servicios en sus diversos tipos conforme a la clasificación de estos hecha por la UIT, que en un inicio fue una forma acertada de clasificarlos debido a que hace unos años las redes de telecomunicaciones se desarrollaban y construían dependiendo el servicio que se quería prestar, pero con la evolución de nuevas plataformas multiservicios de telecomunicaciones, la antigua clasificación de estos ha perdido su validez.

En concordancia al paradigma tecnológico de la convergencia, el marco regulatorio ecuatoriano tiene limitaciones con respecto a su capacidad de regular nuevas tecnologías y servicios convergentes como es el caso de las telecomunicaciones móviles celulares, lo que ocasiona varios problemas en cuanto al control del cumplimiento de parámetros de calidad, control de tarifas, espectro radioeléctrico limitado, clasificación de los servicios.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

1. MIMO es un componente clave en el desarrollo de las tecnologías inalámbricas y provee la mayor parte de las ganancias de throughput en LTE al compararse con tecnologías más antiguas. Sin embargo, las ganancias de MIMO solo se pueden alcanzar en una red totalmente optimizada, lo que requiere un enfoque diferente a la optimización de la red tradicional, con evaluación de las condiciones de propagación de múltiples trayectos que juegan un papel clave en el rendimiento potencial proporcionado por una red LTE con MIMO habilitado. Es por esto que, optimizar una red LTE con MIMO requiere un nuevo conjunto de parámetros de receptor, que todo operador debe tener en cuenta, para mejorar su red LTE a través del ajuste de parámetros de eNBs y antenas.
2. De manera general, ATOLL resulta ser una herramienta bastante útil para la planeación y optimización de redes de telefonía celular a pesar de las limitaciones que tiene la herramienta. La importación de mapas digitales permite obtener resultados bastante cercanos al escenario físico donde se tiene proyectado desplegar la red LTE. Además con esta herramienta se puede asignar automáticamente la identificación física de las celdas y permite manipular los parámetros para mitigar al máximo los errores de asignación.

3. Dentro del estudio de las técnicas de MIMO, no es práctico incrementar el número de antenas en un terminal de usuario final, ya que conlleva a un excesivo consumo de energía que no se puede proveer en las condiciones tecnológicas actuales y por los costos que esto implicaría para el proveedor. Para poder obtener las ventajas teóricas que se pueden obtener con las diversas técnicas de MIMO, se debe realizar una correcta planificación de un sistema de telecomunicaciones. En primera instancia se debe establecer los objetivos de cobertura que se requieren cumplir, lo que permite definir los parámetros físicos de la configuración del sistema de antenas en el lado del transmisor, siendo éste un factor importante debido a que la incorrecta asignación de los parámetros físicos puede incrementar la interferencia dentro de la red, además de afectar la capacidad de la red y la calidad de la señal, trayendo consigo incidencias negativas en el acceso y la continuidad del servicio.
4. En el estudio AMS, es importante establecer un correcto umbral de potencia de las señales DRFS para poder beneficiarse de las ventajas, en cuanto a capacidad y cobertura que proporciona esta técnica en comparación con las de diversidad o multiplexación espacial, por lo que si no se selecciona un correcto valor de potencia, se introduce interferencia al sistema obteniendo así resultados desfavorables para el funcionamiento de la red. Para las señales que no cumplan con los valores mínimos de potencia está la opción de utilizar la multiplexación espacial o la técnica de diversidad.
5. Una de las características principales que se observó dentro de los análisis, es la ventaja que presenta MU-MIMO con respecto a las otras técnicas de MIMO. MU-MIMO, permite enviar datos de forma simultánea, consiguiendo el aumento de la tasa de transferencia de datos al UE final, por lo que se lo puede considerar como una de las técnicas apropiadas para los servicios en tiempo real, como las videoconferencias, Voip juegos online y demás servicios que requieren altas tasas de transferencia de datos.

6. La Agregación de Portadora es una tecnología que soluciona los problemas de espectro fragmentado que tienen hoy en día los operadores, permitiendo canales más grandes de espectro e infraestructuras de red más eficientes. Esto es evidente por el progreso en el desarrollo de esta esta tecnología a lo largo de las facetas de la industria desde los estándares hasta los dispositivos de red, ganando impulso rápidamente con los operadores que despliegan la tecnología alrededor del mundo. Una de las ventajas de la agregación de portadoras en la banda de 700 Mhz es su amplio rango de cobertura, lo que es bastante práctico en zonas rurales, donde se puede priorizar la cobertura por encima de la calidad o capacidad de la red.

### **RECOMENDACIONES**

1. Con información más exacta sobre las condiciones de múltiples trayectos en redes existentes LTE se puede mejorar la planificación de futuras redes con capacidades MIMO; este conocimiento se volverá valioso tan pronto los usuarios dependan que LTE les provea de la tasa de transmisión que necesitan para sus aplicaciones móviles. Los operadores que puedan maximizar el desempeño de MIMO en sus redes LTE serán capaces de proveer los mejores servicios a sus usuarios con la menor cantidad de inversión en infraestructura y proveyendo una clara ventaja competitiva tanto en precios como en calidad de servicio.
2. Se debe tener en consideración que se necesita realizar una re-estructuración de las antenas en el lado del transmisor, esto para que las técnicas MIMO influyan de manera positiva en el desempeño de una red, se requiere de alta disponibilidad de flujos espaciales independientes. Eso se puede conseguir cambiando el modelo de antenas con apertura de  $33^\circ$  en vez de las antenas de  $65^\circ$  que se utiliza en el presente estudio; además de una reorganización de los azimuts y tilts eléctricos para poder crear un escenario de múltiples trayectos que brinda más ventajas en cuanto a la calidad y capacidad de la red.
3. Para garantizar el impacto positivo que conlleva implementar una portadora adicional dentro de una red 4G LTE, se debe realizar una correcta planificación de vecindades entre las diferentes portadoras, fijando los umbrales de re-selección de las celda y evitar el efecto rebote que pueda perjudicar la percepción del usuario. Es importante revisar e implementar estrategias de balanceo de cargas de tráfico, con la finalidad de equiparar la cantidad de usuarios y homologar el tráfico que cursa por las celdas, consiguiendo al final evitar la saturación de los recursos de una sola portadora y obtener una mejor percepción de usuario. Además de esto, se debe realizar un correcto control de la propagación de los transmisores en los que se implementa una segunda portadora de baja frecuencia, para reducir el problema de la contaminación y traslape, que pueden

acarrear problemas en cuanto a la calidad de la señal y capacidad de la red, pero obteniendo buenos niveles de cobertura.

4. Se recomienda realizar una revisión de los parámetros de calidad de servicio de una red 4G LTE, para posteriormente establecerlos como indicadores de referencia para medir el correcto desempeño, debido a que en la actualidad no existe una norma técnica vigente que permita al ente regulador, monitorizar, regular y controlar las operaciones y la calidad de servicio que ofertan los operadores de Servicio Móvil Avanzado.
5. La red LTE trae consigo nuevas consideraciones que, por su complejidad, trae nuevos retos a los operadores de telecomunicaciones a nivel mundial. Es necesario tomar en cuenta las buenas prácticas que por años las operadoras han implementado y que se han propuesto en este documento a manera de introducción y así poder cubrir, en un primer nivel, los requisitos mínimos necesarios para la buena operatividad de la red LTE. Dentro de estos retos y requisitos están:
  - La construcción de nuevos sitios
  - La compartición con otras tecnologías
  - La eliminación de la interferencia y el ruido
  - La superación de la intermodulación pasiva (PIM)
6. Es pertinente que para futuros trabajos de investigación, se profundice el estudio del enlace descendente de LTE con la incorporación de capacidades de intercambio adaptativo de MIMO; esto, por cuanto el tráfico real es una mezcla de diferentes usuarios en una celda y, por lo tanto, es esencial realizar estudios usuarios únicos y usuarios múltiples MIMO utilizando antenas reales en campo con estas características para representar de mejor manera el desempeño de la red.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ITU, «Informe sobre Medición de la Sociedad de la Información.,» ITU, Ginebra, 2015.
- [2] Ericsson, «June 2016. Ericsson Mobility Report,» Ericsson, Stockholm, 2016.
- [3] GSM Association, «The Mobility Economy 2015,» GSMA Intelligence, London, 2015.
- [4] D. Gómez, «Aceleración de Banda Ancha en las Américas,» 4G Américas, 2012.
- [5] SENPLADES, «Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017,» [En línea]. Available: <http://www.buenvivir.gob.ec/versiones-plan-nacional>. [Último acceso: 10 July 2016].
- [6] MINTEL, «Plan Nacional de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información,» [En línea]. Available: <http://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2016/08/Plan-de-Telecomunicaciones-y-TI..pdf>. [Último acceso: 20 August 2016].
- [7] Rohde & Schwarz, *LTE Transmission Modes and Beamforming, White Paper, 1MA186\_2e*, Rohde & Schwarz, 2015.
- [8] INEC, «Población, Superficie (Km2), Densidad Poblacional a nivel Parroquial,» Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, Quito, 2010.
- [9] Forsk, «ATOLL - Wireless Network Engineering Software,» Forsk, March 2015. [En

- línea]. Available: <http://www.forsk.com/atoll/>. [Último acceso: 12 July 2016].
- [10] MINTEL, «Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información,» [En línea]. Available: <http://www.telecomunicaciones.gob.ec/>. [Último acceso: 01 September 2016].
- [11] ETSI TS 102 250-2, «QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 2: Definition of Quality of Service parameters and their computation,» ETSI, 2015.
- [12] CONATEL, «Informe Ampliatorio relacionado con la revisión y actualización de parámetros de calidad del Servicio Móvil Avanzado. Resolución-TEL-042-01-CONATEL-2014,» ARCOTEL, 2014.
- [13] ICNIRP, «International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection,» [En línea]. Available: <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdlesp.pdf>. [Último acceso: 13 August 2016].
- [14] ARCOTEL, «Noticias ARCOTEL sobre emisiones electromagnéticas de la telefonía móvil,» [En línea]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec/se-explico-el-control-a-las-emisiones-electromagneticas-de-la-telefonía-movil-a-estudiantes-de-la-espol-de-guayaquil/>. [Último acceso: 17 July 2015].
- [15] ITU-T K.52, «Guidance on complying with limits for human exposure to electromagnetic fields,» ITU, 2014.
- [16] UIT-T K.83, «Monitoring of electromagnetic field levels,» ITU, 2011.
- [17] CONATEL, «Resolución 01-01-CONATEL-2005: Reglamento de Protección de Emisiones de Radiación no Ionizante generadas por uso de frecuencias del espectro radioeléctrico,» CONATEL, 2005.
- [18] GSMA, «LTE: Technology and Health. 4G and Mobile Wide Band,» GSMA, London, 2014.
- [19] Federal Office for Radiation Protection, «German Mobile Telecommunication Research Programme (DMF),» [En línea]. Available: <http://www.bfs.de/EN/topics/emf/mobile-communication/research-report/research->

- report\_node.html. [Último acceso: 14 August 2016].
- [20] Federal Office for Radiation Protection, «German Mobile Telecommunication Research Programme (DMF),» [En línea]. Available: <http://www.bfs.de/EN/topics/emf/mobile-communication/protection/precaution/mobile-phones.html>. [Último acceso: 14 August 2016].
- [21] Budapest University of Technology and Economics, «The evolution of modern cellular networks,» Budapest, 2015.
- [22] R. A. Gershon, *Media, Telecommunications, and Business Strategy*, 2nd Edition, New York: Routledge, 2013.
- [23] P. Sharma, «Evolution of Mobile Wireless Communication Networks 1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network,» *International Journal of Computer Science and Mobile Computing Vol. 2*, pp. 47-53, 2013.
- [24] M. Gorricho y J. L. Gorricho, *Comunicaciones móviles*, Barcelona: Ediciones UPC, 2002.
- [25] M. Figueroa De la Cruz, *Introducción a los sistemas de telefonía celular*, Argentina: Editorial Hispano Americana HASA, 2009.
- [26] M. Meraj, «Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G,» *International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol 6(3)*, pp. 2545-2551, 2015.
- [27] ITU-R, «Principles for the process of development of IMT-Advanced,» *Resolution ITU-R 57*, 2007.
- [28] S. Sesia, I. Toufik y M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Second Edition, Wiley, 2011.
- [29] R. Augusti, F. B. Álvarez, F. Casadevall, R. Ferrús Ferre, J. Pérez Romero y O. Sallent Roig, *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*, España: Vodafone España, 2010.



- [30] L. Song y J. Shen, Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE, Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [31] 3GPP TS 29.061, «Interworking between the Public Land Mobile Network (PLMN) supporting packet based services and Packet Data Networks (PDN),» 3GPP.
- [32] 3GPP TS 23.401, «General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access,» 3GPP.
- [33] 3GPP TS 29.281, «General Packet Radio System (GPRS) Tunnelling Protocol User Plane (GTPv1-U),» 3GPP.
- [34] 3GPP TS 29.274, «3GPP Evolved Packet System (EPS); Evolved General Packet Radio Service (GPRS) Tunneling Protocol for Control Plane (GTPv2-C); Stage 3,» 3GPP.
- [35] IETF RFC 3588, «Diameter Base Protocol,» 3GPP.
- [36] 3GPP TS 23.228, «IP Multimedia Subsystem (IMS); Stage 2,» 3GPP.
- [37] 3GPP TR 36.213 v9.3.0, «Technical specification group RAN; requeriments for E-UTRA; physical layer procedures, Release 9,» 3GPP.
- [38] P. Venkateswarlu y R. Nagendra, «Channel Estimation Techniques in MIMO-OFDM LTE Systems,» *Journal of Engineering Research and Applications*, pp. 157-161, 2014.
- [39] E. Dahlman, S. Parkvall y J. Sköld, 4G: LTE / LTE-Advanced for Mobile Broadband. Second Edition, Academic Press, 2013.
- [40] PCTEL RF Solutions, «Maximizing LTE Performance through MIMO Optimization. White Paper,» USA, 2011.
- [41] UIT-R, «Actas Finales CMR-07. Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones,» UIT, Ginebra, 2007.
- [42] Radiocommunication Bureau, «Circular Letter 5/LCCE/2, 'Invitation for submission of proposals for candidate radio interface technologies for the terrestrial components of the radio interface(s) for IMT-Advanced and invitation to participate

in their subsequent evaluation',» UIT, Ginebra, 2008.

- [43] A. R. Mishra, Advanced Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G.. Evolution to 4G, John Wiley & Sons, 2007.
- [44] S. Lingyang y S. Jia, Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE, Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [45] ARCOTEL, «Estadísticas del Servicio Móvil Avanzado,» [En línea]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec/servicio-movil-avanzado-sma/>. [Último acceso: 13 August 2016].
- [46] Rueda y Vargas, «Calidad de Servicio en Redes LTE-Advanced (Long Term Evolution-Advanced),» Cinintel, Colombia, 2015.
- [47] Nokia Siemens Network, «Nokia Siemens Networks LTE Radio Access, Rel. 10 Operation Documentation,» Nokia Siemens Network, Finlandia, 2014.
- [48] Huawei, «LTE KPI REFERENCES,» HUAWEI Technologies, CHINA, 2014.
- [49] Nokia, «LTE-ADVANCE carrier Aggregation Optimization,» Nokia, Finlandia, 2015.

## ANEXO A: PANTALLAS DE SIMULACIÓN

### A. PANTALLAS DE SIMULACIÓN

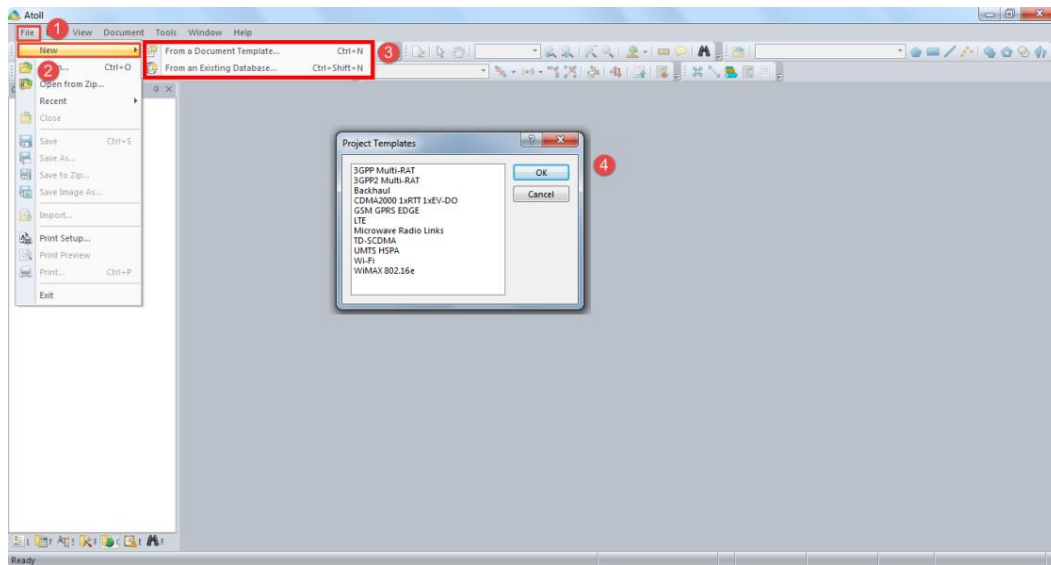


Figura A.1. Creación de un proyecto en ATOLL basado en plantillas

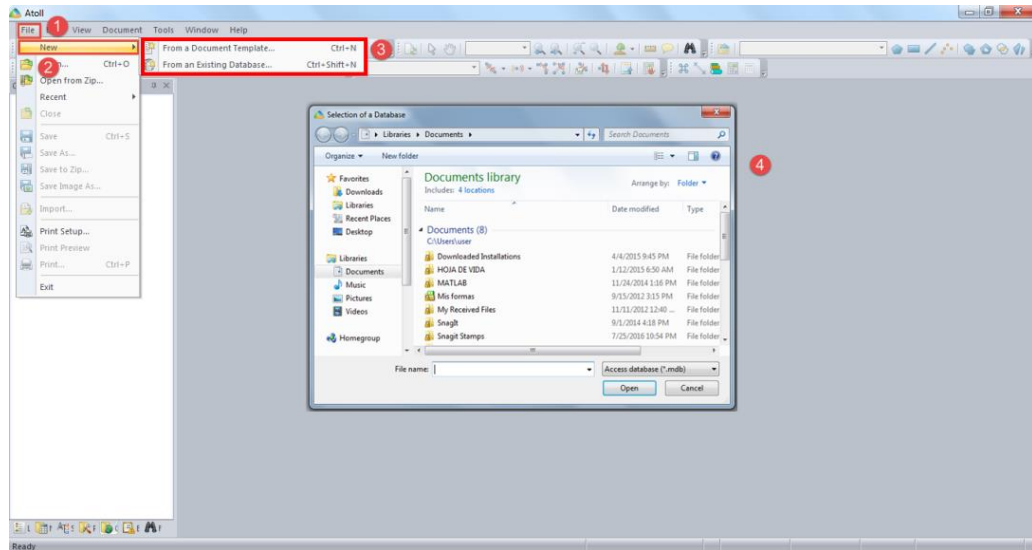


Figura A.2. Creación de un proyecto en ATOLL a partir de una base de datos

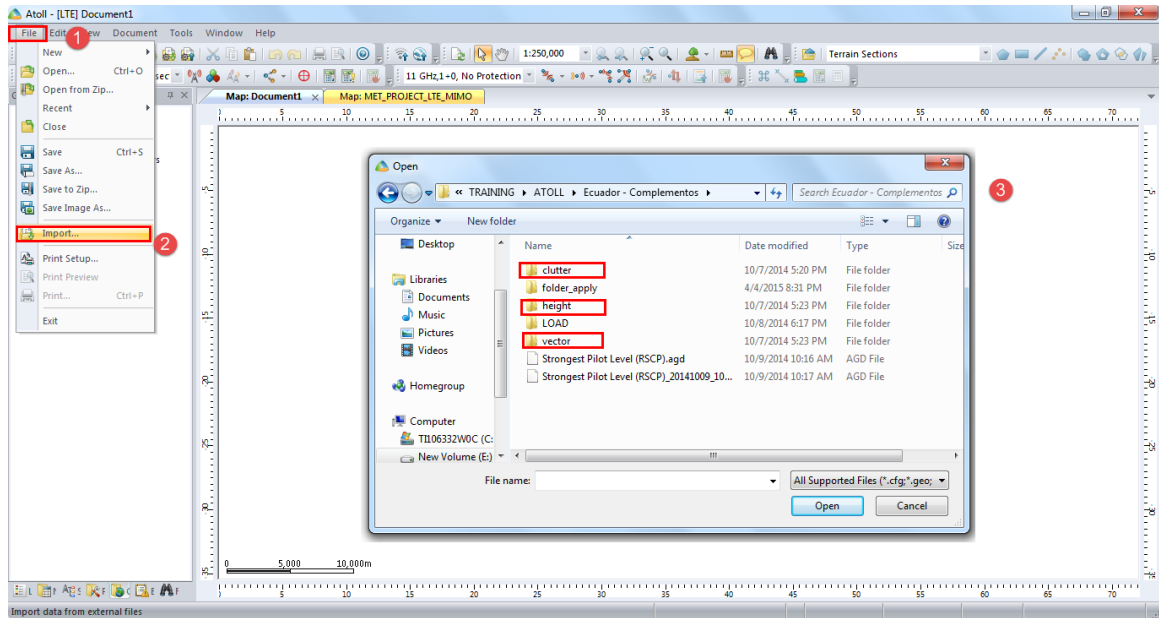


Figura A.3. Importación de datos geográficos en ATOLL

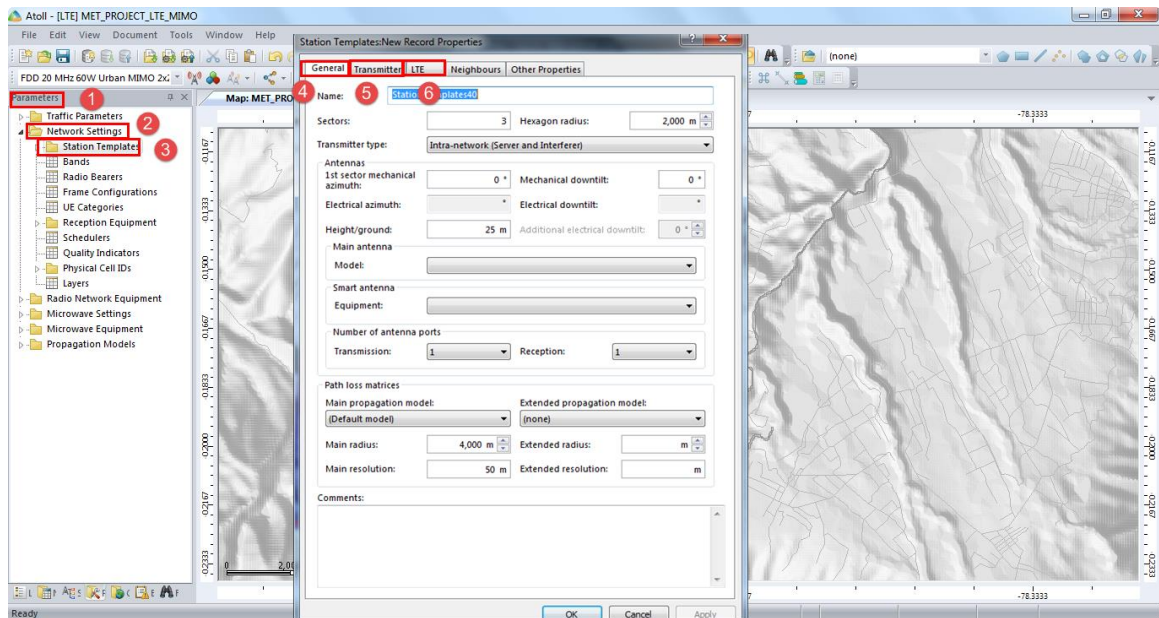


Figura A.4. Creación de una plantilla de eNB en ATOLL

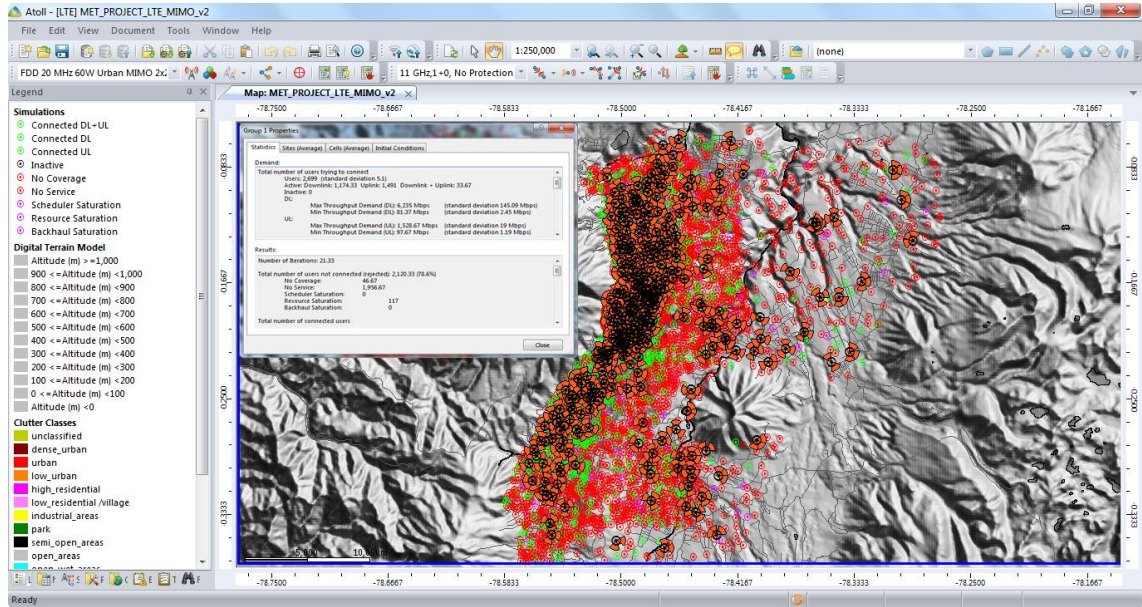


Figura A.5. Simulación Monte Carlo del tráfico con ATOLL

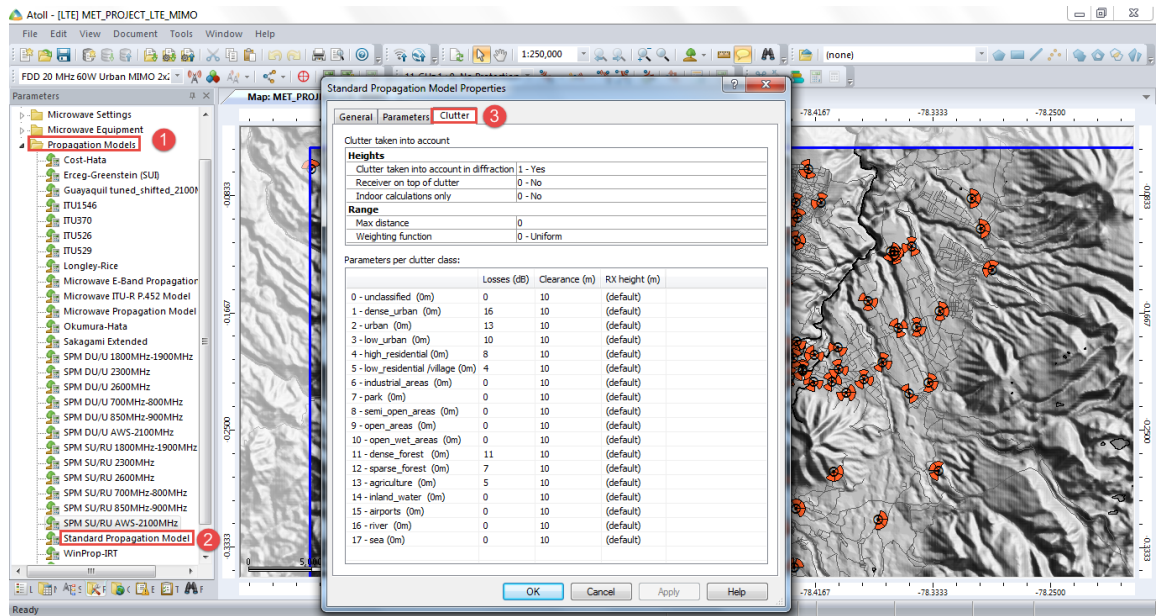


Figura A.6. Configuración del modelo de propagación estándar en ATOLL

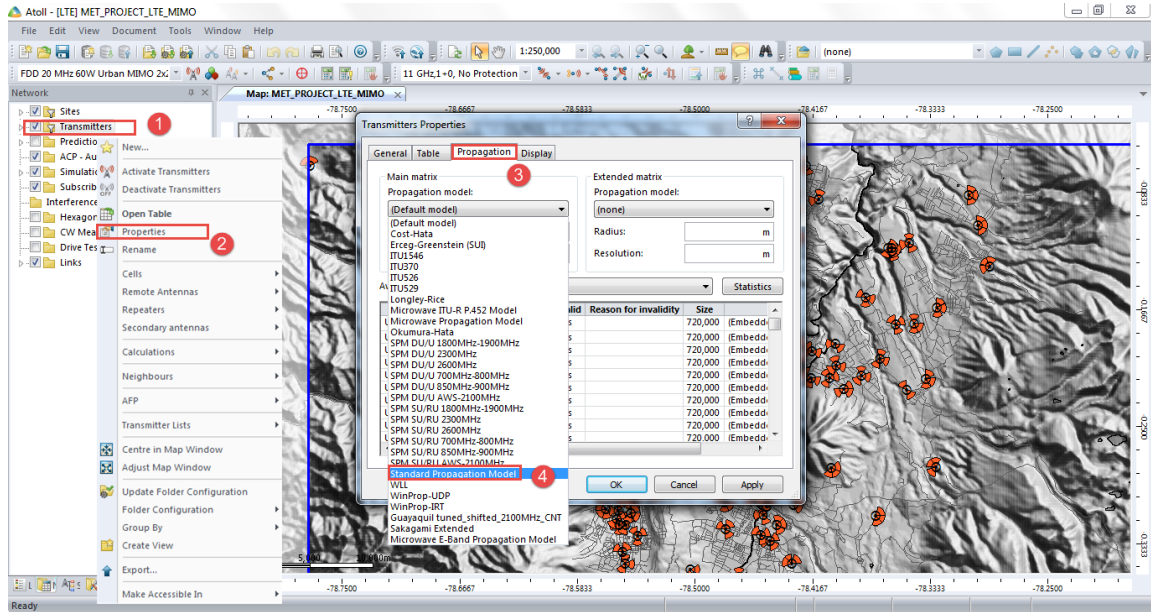


Figura A.7. Establecimiento del modelo de propagación en los transmisores

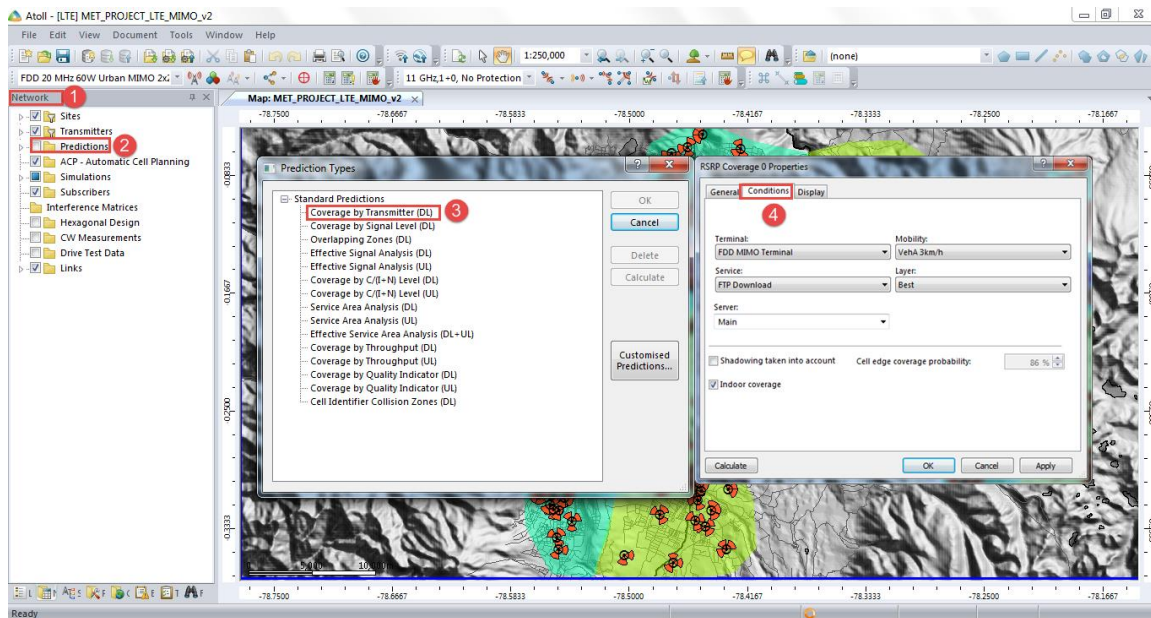


Figura A.8. Proceso para creación de predicción de cobertura en ATOLL

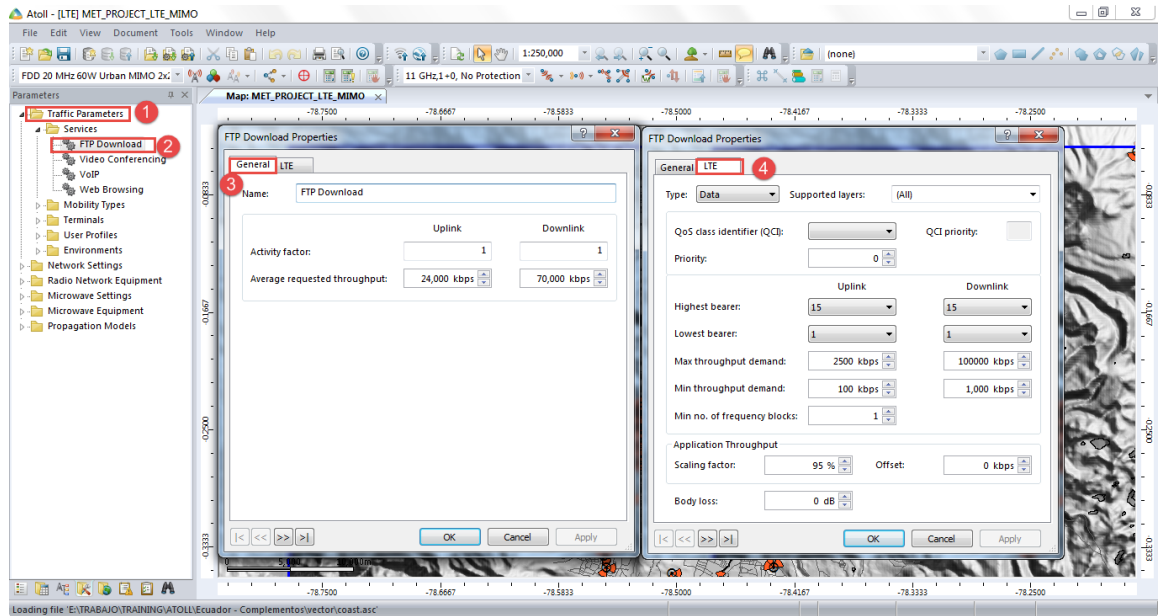


Figura A.9. Configuración del servicio Descarga FTP

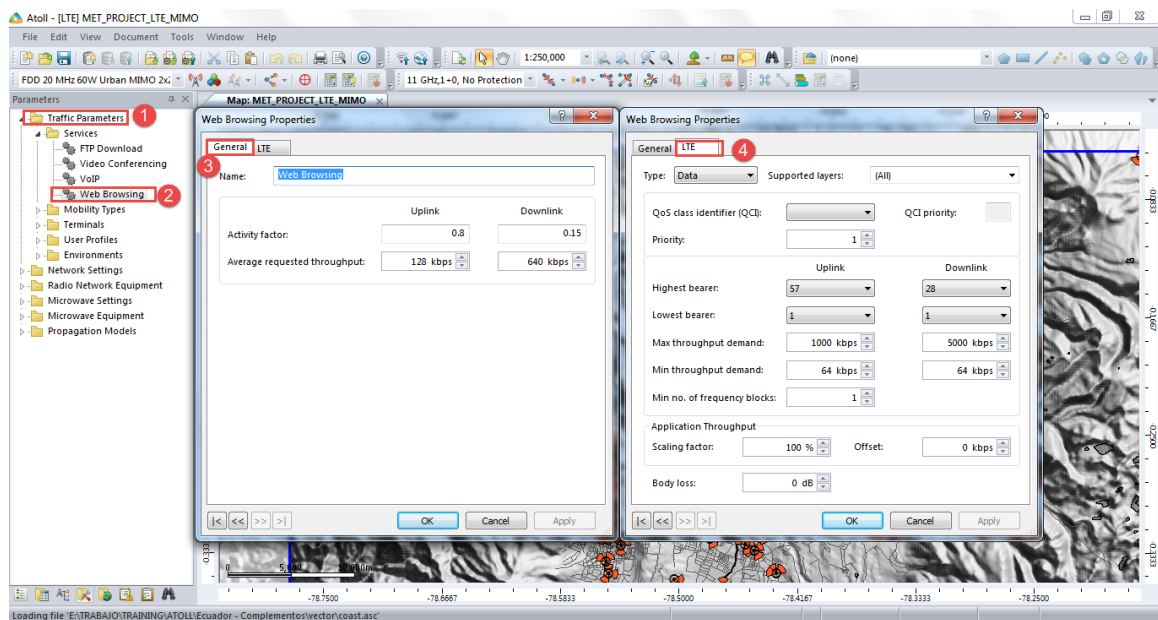


Figura A.10. Configuración del servicio Navegación Web

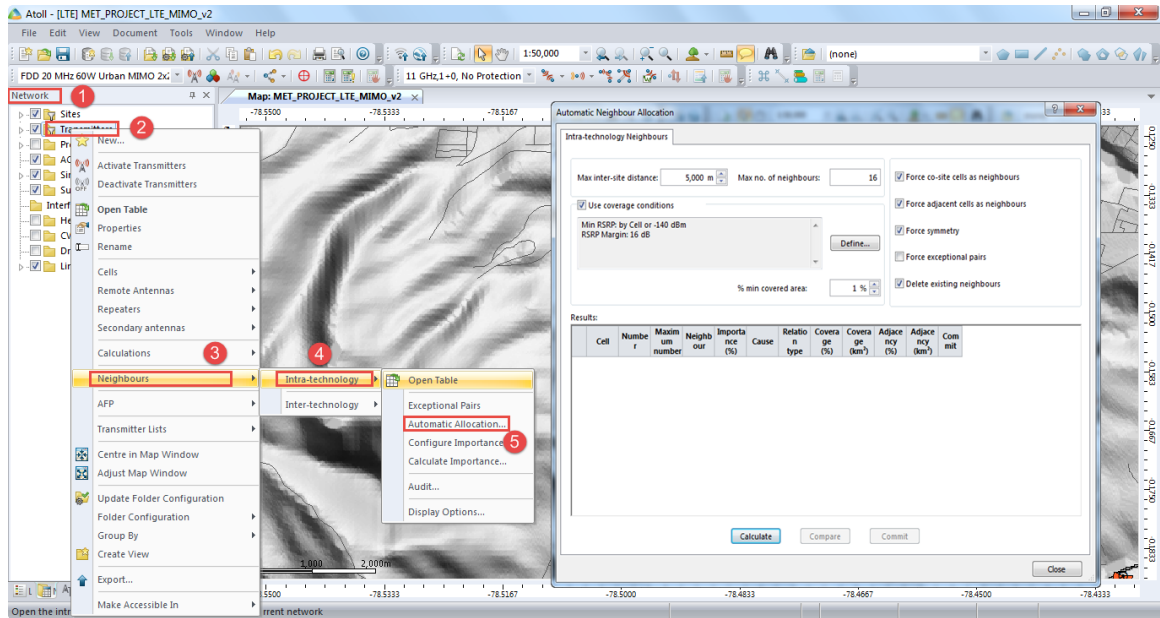


Figura A.11. Configuración de vecindades en ATOLL

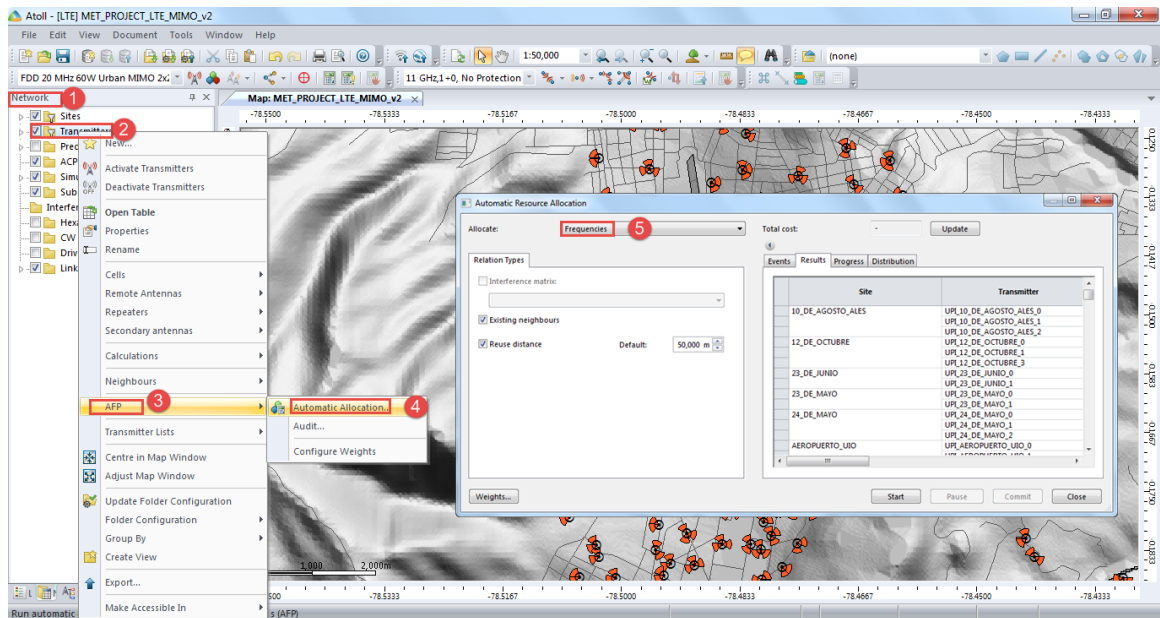


Figura A.12. Configuración de frecuencias en ATOLL



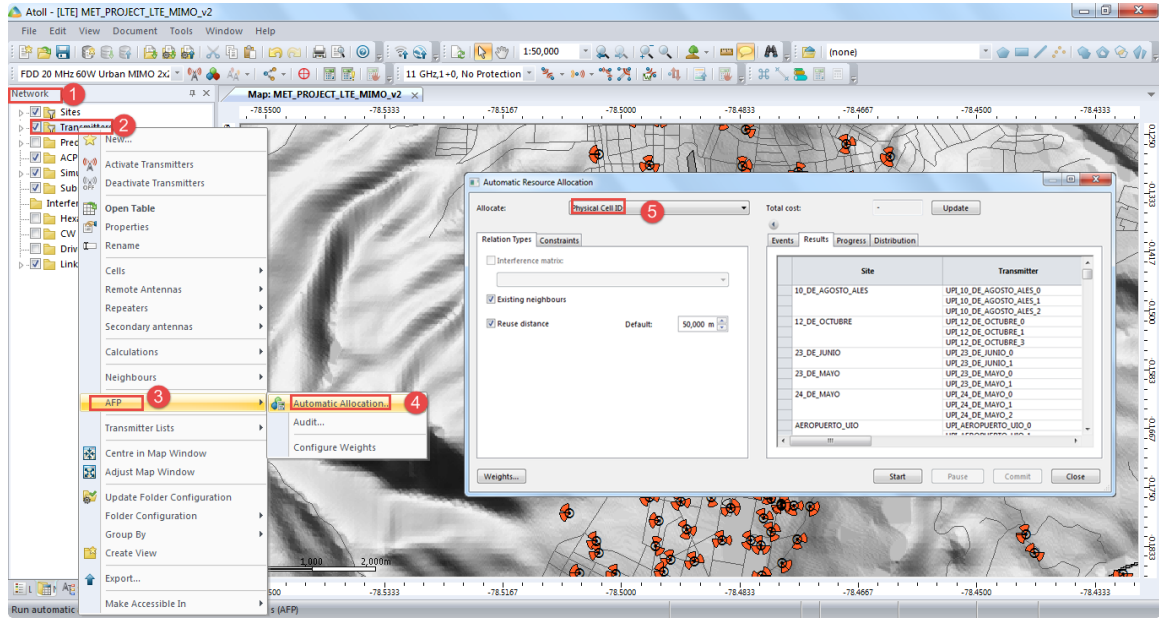


Figura A.13. Configuración de identificación de celda física

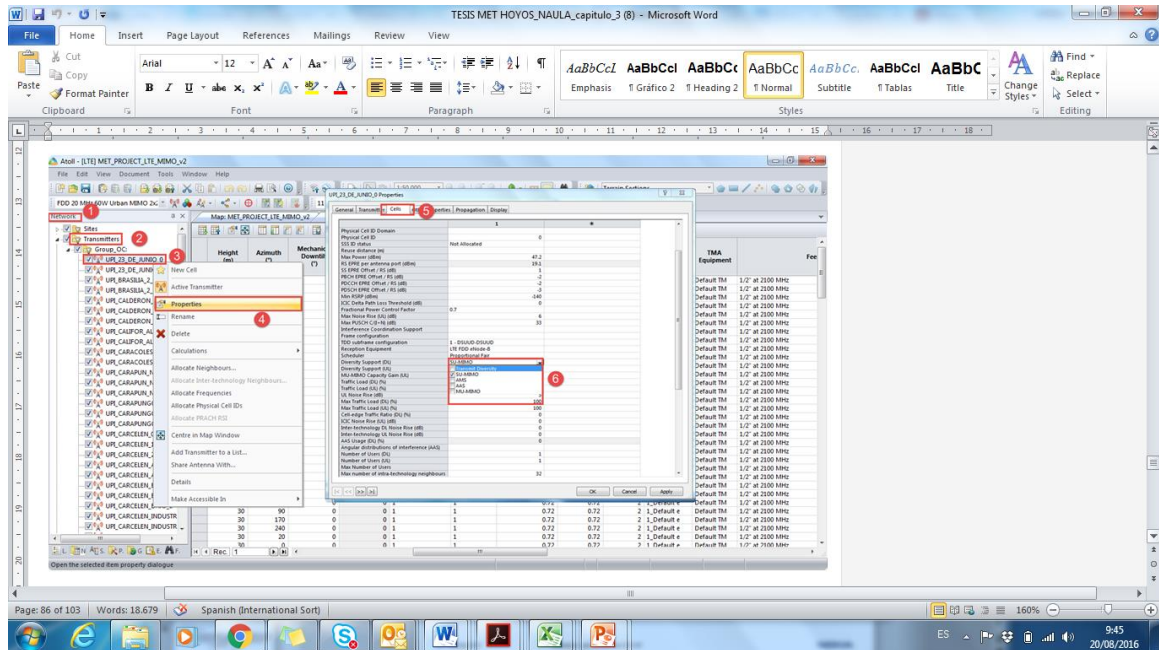


Figura A.14. Procedimiento para la configuración MIMO

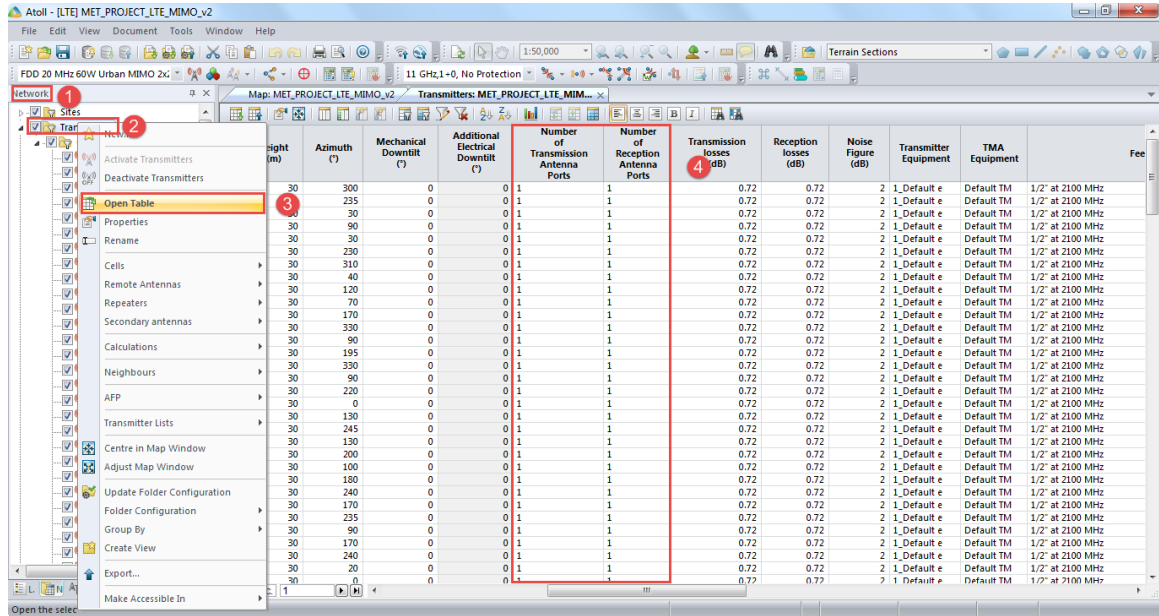


Figura A.15. Configuración de puertos de transmisión y recepción

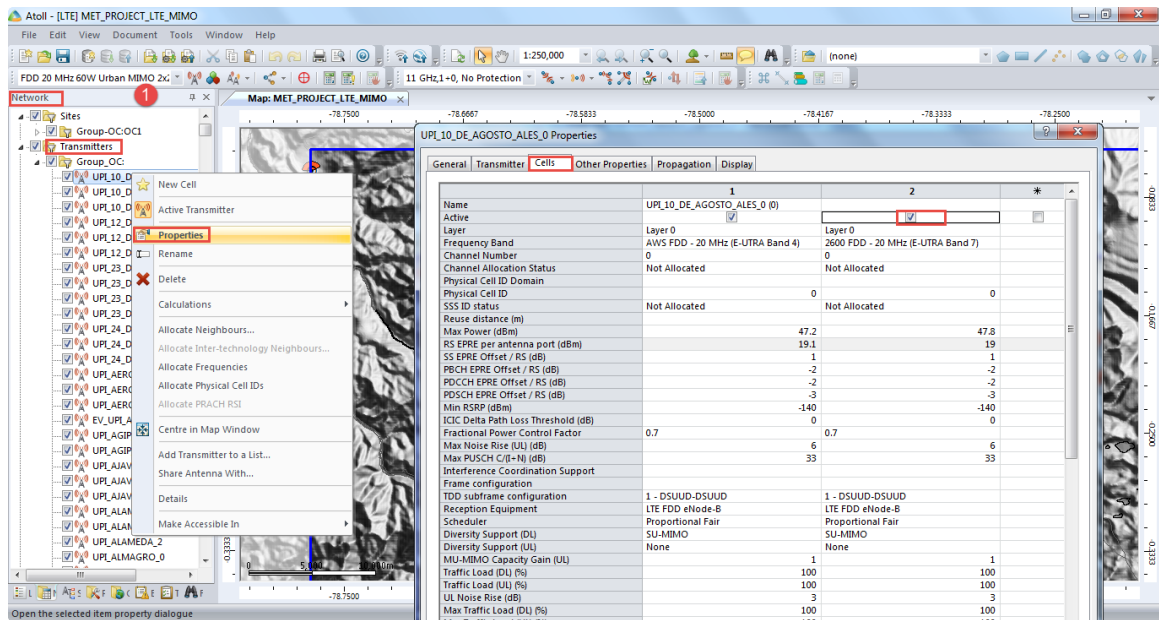


Figura A.16. Configuración para añadir un Componente de Portadora