

ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y COBERTURA DE UNA RED MÓVIL LTE PARA LA CIUDAD DE POPAYÁN



**Pablo Esteban Díaz Molina
Paula Andrea Urbano Molano**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e Inalámbricas-GRIAL
Línea de Investigación Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados
en Radio
Popayán, 2012**

ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y COBERTURA DE UNA RED MÓVIL LTE PARA LA CIUDAD DE POPAYÁN



**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título
de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Pablo Esteban Díaz Molina
Paula Andrea Urbano Molano**

Director
Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e Inalámbricas-GRIAL
Línea de Investigación Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados
en Radio
Popayán, 2012**



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. CONSIDERACIONES INICIALES PARA EL DISEÑO DE UNA RED MÓVIL	
LTE	3
1.1 CONCEPTOS GENERALES	3
1.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA	7
1.2.1 E-UTRAN.....	7
1.2.2 EPC.	8
1.3 PLANEACIÓN DE LA RED RADIO LTE	12
1.4 PASOS DE LA PLANEACIÓN CELULAR	12
1.4.1 Crear Entorno.	13
1.4.2 Definir Requerimientos del Sistema.....	13
1.4.3 Balance del Enlace.	13
1.4.4 Diseño de la Red LTE para Popayán.....	14
1.4.5 Modelado de Tráfico.	14
2. PLANEACIÓN DE UNA RED LTE PARA LA CIUDAD DE POPAYÁN.....	16
2.1 ACERCA DE ATOLL.....	16
2.2 CREACIÓN DEL ESCENARIO EN ATOLL.....	17
2.3 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	20
2.3.1 Velocidad de Transmisión de Datos Objetivo	20
2.3.2 Tipos de Movilidad del UE	23
2.3.3 Requerimientos de Cobertura	24
2.3.4 Requerimientos de Capacidad	25
2.4 BALANCE DEL ENLACE RADIO	25
2.4.1 Modelos de Propagación	27
2.4.1.1 Modelo Okumura-Hata.....	27
2.4.1.2 Modelo Cost-Hata.....	28
2.4.2 Consideraciones sobre el Balance del Enlace	29
2.5 DISEÑO INICIAL DE ACUERDO A COBERTURA DE LA RED MÓVIL LTE	
PARA LA CIUDAD DE POPAYÁN	36
2.6 PLANEACIÓN DE CAPACIDAD	37
2.7 DISEÑO DE ACUERDO A CAPACIDAD DE LA RED MÓVIL LTE PARA LA	
CIUDAD DE POPAYÁN	41
3. ANÁLISIS DE COBERTURA DE LA RED MÓVIL LTE DE POPAYÁN	
UTILIZANDO LA HERRAMIENTA ATOLL	42
3.1 CONSIDERACIONES.....	42
3.1.1 Fenómenos Presentes en la Propagación de la Señal RF	43



3.1.2 Relación Portadora a Interferencia y Ruido	44
3.2 ESCENARIO 1 DE SIMULACIÓN: COMPARACIÓN DE RESULTADOS .	44
3.2.1 Análisis de Cobertura por Mejor Portadora LTE en el Enlace de Bajada	44
3.2.2 Análisis de Cobertura por <i>Throughput</i> en el Enlace de Bajada	48
3.2.3 Análisis de Cobertura por Mejor Portadora en el Enlace de Subida	49
3.3 ANÁLISIS DE COBERTURA POR NIVEL DE SEÑAL	51
3.4 ESCENARIO 2 DE SIMULACIÓN – EFECTO DE LA INCLUSIÓN DE NUEVOS SITIOS A LA RED	52
3.4.1 Inclinación de Antenas como Mecanismo de Reducción de Interferencia	54
3.4.2 Reúso de Frecuencia como Mecanismo de Reducción de Interferencia	59
3.5 ESCENARIO 3 – EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE DIVERSIDAD EN TRANSMISIÓN	65
4. ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE LA RED MÓVIL LTE DE POPAYÁN UTILIZANDO ATOLL	68
4.1 CONSIDERACIONES	68
4.1.2 Configuración de los Servicios.....	69
4.1.3 Planificadores de Paquetes	71
4.2 ALGORITMO PARA SIMULACIÓN DE TRÁFICO LTE	72
4.2.1. Generación y Distribución de Usuarios.....	72
4.2.2. Determinación del Mejor Servidor.....	72
4.2.3. Cálculos Correspondientes al Enlace de Bajada	72
4.2.4. Cálculos Correspondientes al Enlace de Subida	72
4.2.5. Gestión de Recursos Radio	72
4.2.5.1 Determinación del <i>throughput</i> pico de canal.....	72
4.2.5.2 Selección de usuarios para la asignación de recursos	72
4.2.5.3 Asignación de recursos para satisfacer las demandas mínimas de <i>throughput</i>	72
4.2.5.4 Asignación de recursos para satisfacer las demandas máximas de <i>throughput</i>	73
4.2.5.5 Asignación de recursos para satisfacer las demandas máximas de <i>throughput</i> utilizando <i>Proportional Fair</i>	74
4.3 ESCENARIO 1- THROUGHPUT DE USUARIO EN EL CENTRO Y BORDE DE LA CELDA.....	76
4.4 ESCENARIO 2- EFECTO DE LA INCLINACIÓN DE ANTENAS SOBRE LA CAPACIDAD.....	78
4.5 ESCENARIO 3- EFECTO DEL REUSO DE FRECUENCIAS SOBRE LA CAPACIDAD	82



4.6 ESCENARIO 4- EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS MIMO SOBRE LA CAPACIDAD	85
4.7 ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y COBERTURA PARA EL DISEÑO FINAL DE LA RED LTE	89
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	93
5.1 CONCLUSIONES	93
5.2 TRABAJO FUTURO.....	94



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Evolución de los sistemas celulares hasta LTE	3
Figura 1.2 Arquitectura de red.....	10
Figura 1.3 Comparación del plano de control y de datos 2G/3G y LTE	11
Figura 1.4 Arquitectura de protocolos de la interfaz radio LTE.....	11
Figura 1.5 Pasos para la planeación de una red	12
Figura 2.1 Mapa de elevaciones de Popayán	18
Figura 2.2 Mapa de <i>clutters</i> de Popayán.....	19
Figura 2.3 Mapa malla vial de Popayán	19
Figura 2.4 Entorno final de trabajo	20
Figura 2.5 Área de cobertura objetivo	24
Figura 2.6 Distancia vs Pérdidas.....	32
Figura 2.7 SNR vs Velocidad pico de transmisión.....	33
Figura 2.8 Tipos de sitios	34
Figura 2.9 Número de sitios vs radio de la celda.....	36
Figura 2.10 Diseño inicial de la red	37
Figura 2.11 Diseño final red móvil LTE para Popayán	41
Figura 3.1 Cobertura DL para el canal AWGN	46
Figura 3.2 Cobertura DL para el canal EVA	47
Figura 3.3 <i>Throughput</i> obtenido de acuerdo al MCS.....	48
Figura 3.4 Predicción de cobertura por nivel de la señal.....	51
Figura 3.5 Cobertura por mejor portadora LTE en DL (3 Sectores)	53
Figura 3.6 Interferencia causada por la inclusión de nuevos sitios	53
Figura 3.7 <i>Tilt</i> mecánico y eléctrico	55
Figura 3.8 Efectos de un <i>tilt</i> de 4° sobre la red	56
Figura 3.9 Efectos de un <i>tilt</i> de 7° sobre la red	57
Figura 3.10 Efectos de un <i>tilt</i> de 14° sobre la red.....	58
Figura 3.11 Esquemas de reúso	61



Figura 3.12 Efecto del reuso duro de frecuencia usando AFP	62
Figura 3.13 Efecto de la interferencia usando plan de frecuencias manual	63
Figura 3.14 Predicción por zonas superpuestas	64
Figura 3.15 Reducción de interferencia al implementar diversidad en transmisión	66
Figura 4.1 Distribución de usuarios para el centro y borde de la celda	77
Figura 4.2 Distribución de usuarios para la red LTE diseñada	78
Figura 4.3 Usuarios rechazados por celda de acuerdo al <i>tilt</i> (UL).....	80
Figura 4.4 <i>Throughput</i> por celda de acuerdo al <i>tilt</i> en el UL.....	80
Figura 4.5 Usuarios rechazados por celda de acuerdo al <i>tilt</i> (DL).....	81
Figura 4.6 <i>Throughput</i> por celda de acuerdo al <i>tilt</i> en el DL.....	81
Figura 4.7 Usuarios rechazados por celda utilizando reuso de frecuencias.....	83
Figura 4.8 <i>Throughput</i> por celda utilizando reuso de frecuencias en el UL.....	83
Figura 4.9 <i>Throughput</i> por celda utilizando reuso de frecuencias en el DL.....	84
Figura 4.10 Usuarios rechazados por celda de las técnicas MIMO.....	86
Figura 4.11 <i>Throughput</i> por celda de las técnicas MIMO en el UL.....	86
Figura 4.12 Usuarios rechazados por celda al implementar MIMO	87
Figura 4.13 <i>Throughput</i> por celda de las técnicas MIMO en el DL.....	88
Figura 4.14 Diseño final de la red LTE para la ciudad de Popayán.....	90
Figura 4.15 Alternativa diseño final de la red LTE para la ciudad de Popayán	91



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1 Bandas de operación-modo FDD	5
Tabla 1.2 Bandas de operación-modo TDD	6
Tabla 1.3 Anchos de banda disponibles según la banda de frecuencia.....	7
Tabla 1.4 Elección del modelo de propagación.....	14
Tabla 2.1 Velocidades pico para el DL.....	21
Tabla 2.2 Velocidades pico para el UL.....	21
Tabla 2.3 Velocidad del UE según los corrimientos de frecuencia Doppler	23
Tabla 2.4 Cálculo máximas pérdidas de propagación permitidas para el UL.....	26
Tabla 2.5 Cálculo máximas pérdidas de propagación permitidas para el DL.....	26
Tabla 2.6 Factor de corrección de acuerdo al tamaño de la ciudad	29
Tabla 2.7 Parámetros de los modelos Okumura-Hata y Cost-Hata.....	30
Tabla 2.8 Parámetros y distancia en el DL para 1 antena en recepción	30
Tabla 2.9 Parámetros y distancia en el UL para 2 antenas en recepción	31
Tabla 2.10 Número de sitios requeridos según el rango de la celda.....	35
Tabla 2.11 <i>Throughput</i> DL alcanzado para BLER=0.01	39
Tabla 3.1 Configuración de los transmisores LTE	43
Tabla 3.2 Valores $C/(I+N)$ para AWGN en el DL	46
Tabla 3.3 Valores $C/(I+N)$ para EVA en el DL.....	47
Tabla 3.4 Comparación de resultados DL	49
Tabla 3.5 Valores $C/(I+N)$ para EVA y EPA en el UL	50
Tabla 3.6 Comparación de resultados UL	50
Tabla 3.7 Alcance en metros de la portadora 64QAM 3/4 según el <i>tilt</i>	59
Tabla 3.8 Alcance en metros de la portadora 64QAM 3/4 según el plan de frecuencia.....	64
Tabla 3.9 Alcance en metros de la portadora 64QAM 3/4 utilizando diversidad ...	67
Tabla 4.1 Consideraciones del análisis de capacidad.....	69
Tabla 4.2 Configuración de servicios multimedia en Atoll	70
Tabla 4.3 <i>Throughputs</i> del centro y borde de la celda	77



Tabla 4.4 Ejemplo de porcentaje de tráfico en el UL y DL	84
Tabla 4.5 Número de usuarios que alcanzan la demanda máxima de <i>throughput</i>	88
Tabla 4.6 Estado de los usuarios por enlace de acuerdo a cada escenario	89
Tabla 4.7 Comparación diseño final y alternativo	92



LISTADO DE ACRÓNIMOS

3GPP	Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (<i>Third Generation Partnership Project</i>).
AFP	Plan Automático de Frecuencias (<i>Automatic Frequency Planning</i>).
ANE	Agencia Nacional del Espectro.
AuC	Centro de Autenticación (<i>Authentication Centre</i>).
AWS	Servicios Inalámbricos Avanzados (<i>Advanced Wireless Services</i>).
BH	Hora Pico (<i>Busy Hour</i>).
BLER	Tasa de Error de Bloque (<i>Block Error Rate</i>).
BW	Ancho de Banda (<i>Bandwidth</i>).
CL	Carga de la Celda (<i>Cell Load</i>).
DEM	Modelo de Elevación Digital (<i>Digital Terrain Model</i>).
DL	Enlace de Bajada (<i>Downlink</i>).
e-NodeB	Nodo B Evolucionado (<i>Evolved Node B</i>).
EPA	Modelo A Peatonal Extendido (<i>Extended Pedestrian A Model</i>).
EPC	Núcleo de Paquetes Evolucionado (<i>Evolved Packet Core</i>).
EPS	Sistema Evolucionado de Paquetes (<i>Evolved Packet System</i>).
ETU	Modelo Típico Urbano Extendido (<i>Extended Typical Urban Model</i>).
E-UTRAN	Red de Acceso Radio UMTS Evolucionada (<i>Evolved UMTS Radio Access Network</i>).
EVA	Modelo A Vehicular Extendido (<i>Extended Vehicular A Model</i>).



FDD	Duplexación por División de Frecuencia (<i>Frequency Division Duplex</i>).
GSM	Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (<i>Global System for Mobile Communications</i>).
HLR	Registro de Llamada Local (<i>Home Location Register</i>).
HSPA	Acceso de Paquetes a Alta Velocidad (<i>High Speed Packet Access</i>).
HSS	Servidor de Usuario Local (<i>Home Subscriber Server</i>).
ICIC	Coordinación de Interferencia Inter-Celda (<i>Inter-Cell Interference Coordination</i>).
IMS	Subsistema Multimedia IP (<i>IP Multimedia Subsystem</i>).
LTE	Evolución de Largo Término (<i>Long Term Evolution</i>).
MCI	Máxima Relación Portadora Interferencia (<i>Maximum Carrier to Interference Ratio</i>).
MCS	Esquemas de Modulación y Codificación (<i>Modulation and Coding Schemes</i>).
MFP	Plan Manual de Frecuencias (<i>Manual Frequency Planning</i>).
MIMO	Sistema de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (<i>Multiple Input Multiple Output</i>).
MINTIC	Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.
MME	Entidad de Gestión de Movilidad (<i>Mobility Management Entity</i>).
OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>).
OMC	Centro de Operación y Mantenimiento (<i>Operation and Maintenance Centre</i>).
PBC	Canal de Difusión Físico (<i>Physical Broadcast Channel</i>).
PCFICH	Canal Físico Indicador de Formato de Control (<i>Physical Control</i>



Format Indicator Channel).

PCRF	Función de Políticas y Tarificación de Recursos (<i>Policy Charging and Rules Functions</i>).
PD	Demanda Proporcional (<i>Proportional Demand</i>).
PDCCH	Canal Físico de Control del DL (<i>Physical DL Control Channel</i>).
PDN-GW	Pasarela de Red de Datos de Paquetes (<i>Packet Data Network Gateway</i>).
PF	Asignación Equitativa (<i>Proportional Fair</i>).
PFR	Reúso Fraccional de Frecuencia (<i>Partial Frequency Reuse</i>).
PHICH	Canal Físico Híbrido Indicador de Solicitud de Retransmisión Automática (<i>Physical Hybrid Automatic Repeat Request Indicator Channel</i>).
QoS	Calidad de Servicio (<i>Quality of Service</i>).
RAN	Red de Acceso Radio (<i>Radio Access Network</i>).
RB	Bloques de Recurso (<i>Resource Blocks</i>).
RNC	Controlador de la Red Radio (<i>Radio Network Controller</i>).
SAE	Evolución de la Arquitectura del Sistema (<i>System Architecture Evolution</i>).
SC-FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Única Portadora (<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>).
SGW	Pasarela en Servicio (<i>Serving Gateway</i>).
SFR	Reúso Suave de Frecuencia (<i>Soft Frequency Reuse</i>).
SISO	Sistema de Única entrada y Única salida (<i>Single Input Single Output</i>).
TBS	Tamaño de Bloque de Transporte (<i>Transport Block Size</i>).
TDD	Duplexación por División de Tiempo (<i>Time Division Duplex</i>).



TMA	Amplificador Montado en Torre (<i>Tower Mounted Amplifier</i>).
UE	Equipo de Usuario (<i>User Equipment</i>).
UL	Enlace de Subida (<i>Uplink</i>).
UMTS	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>).
WCDMA	Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha (<i>Wide Band Code Division Multiple Access</i>).



INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la demanda de velocidad y cobertura por parte de los usuarios de banda ancha móvil motivó el estudio e implementación del nuevo estándar Evolución de Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) por parte del Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*). Actualmente, LTE es el estándar de comunicaciones móviles más reciente en el mercado, el cual continúa el camino de evolución de tecnologías tales como GSM (2G), WCDMA (3G) y HSPA (3.75G) con mejores características y prestaciones, convirtiéndose en el último paso hacia la cuarta generación de redes móviles (4G) [1]. Estos sistemas tienen como objetivo alcanzar velocidades pico de transmisión de datos de hasta 100 Mbps en el Enlace de Bajada (DL, *Downlink*) y de hasta 50 Mbps en el Enlace de Subida (UL, *Uplink*), al ser implementada en un espectro de 20 MHz. Adicionalmente, LTE brinda una conexión de mayor capacidad y una menor latencia con el fin de soportar nuevos servicios y aplicaciones que requieren mayores niveles de desempeño.

Actualmente, existen 280 compromisos para el despliegue de LTE entre los cuales 89 redes comerciales ya han sido lanzadas en diferentes países a nivel mundial. A través de la empresa UNE COMUNICACIONES, Colombia se convirtió en uno de los primeros países de Latinoamérica en lanzar esta tecnología, a mediados del 2012, en ciudades con alta densidad urbana como Bogotá y Medellín [2]. Sin embargo, el resto de ciudades colombianas no cuentan con estudios para el diseño y planeación de redes móviles basadas en este estándar, que permitan analizar la operación de dichas redes antes de su despliegue, teniendo en cuenta las características geográficas y urbanas de cada una de las ciudades del territorio Colombiano y las características de la tecnología LTE.

El despliegue de esta tecnología sin la debida planeación, genera incertidumbre en los operadores de comunicaciones móviles del país, quienes deben iniciar procesos de planeación de sus redes haciendo uso de la nueva tecnología, teniendo en consideración la infraestructura ya desplegada y las características del mercado y de esta manera aumentar la relación costo-beneficio.

Este trabajo de grado orientó su propósito de estudio, al análisis de la capacidad y cobertura que podría tener la implementación de un sistema de comunicación móvil celular basado en el estándar LTE, en una ciudad pequeña como Popayán, en donde, teniendo en cuenta las características topográficas de dicha ciudad, se



realizó el diseño de la red y variando diferentes parámetros, se analizó su capacidad y cobertura.

Para este fin, las herramientas software de planeación de sistemas de radiofrecuencia se convierten en un elemento de gran importancia, permitiendo analizar el diseño de la red móvil celular para esta ciudad, observando y analizando su comportamiento ante diferentes consideraciones de diseño y determinando el equilibrio adecuado entre capacidad y cobertura. En este trabajo se utilizó la herramienta software de planeación y optimización de radiofrecuencia Atoll 2.8.0¹, con la cual se siguió el proceso de planeación determinando así, el equilibrio óptimo entre capacidad y cobertura.

Este trabajo de grado se dividió en 5 capítulos. El primero abordó los conceptos generales sobre el estándar LTE y las consideraciones iniciales que se deben tener en cuenta en el proceso de diseño y planeación de una red móvil. En el capítulo 2 se realizó el balance del enlace teniendo en cuenta 3 frecuencias y anchos de banda diferentes, esto con el fin de determinar la mejor combinación entre estos dos parámetros y con ella determinar el número de sitios necesarios para realizar el diseño de la red LTE para la ciudad de Popayán y con él cubrir el área objetivo.

El capítulo 3 se enfocó en realizar el análisis de cobertura de la LTE, diseñada en el capítulo 2, variando diferentes parámetros como el ángulo de inclinación de las antenas, la implementación del reúso de radiocanales y diversidad en transmisión. Lo anterior con el fin de determinar la mejor estrategia para mitigar la interferencia presente en el DL.

En el capítulo 4, se realizó el análisis de capacidad de la red diseñada haciendo uso de un mapa de tráfico distribuido a lo largo del área objetivo y variando las mismas configuraciones realizadas en el capítulo 3. Además, este capítulo se enfocó en entender el proceso de asignación de recursos y en determinar la capacidad de la celda y las velocidades alcanzadas por cada usuario.

Finalmente, el capítulo 5 recopiló las conclusiones generadas a partir de los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de este trabajo de grado y además propuso ideas que pueden ser trabajadas a futuro para darle continuación al mismo.

¹ <http://www.forsk.com/>



1. CONSIDERACIONES INICIALES PARA EL DISEÑO DE UNA RED MÓVIL LTE

Este capítulo se enfoca en las consideraciones iniciales que se deben tener en cuenta en el proceso de diseño y planeación de una red móvil. La primera parte de este capítulo tiene como fin contextualizar al lector acerca de los conceptos más relevantes asociados al estándar LTE, tales como: esquemas de modulación y codificación, técnicas de acceso al medio, arquitectura de red, bandas de frecuencia y anchos de banda, entre otros. En la segunda parte, se describe de forma general la metodología del proceso de diseño y planeación de una red móvil LTE.

1.1 CONCEPTOS GENERALES

LTE (*Release 8*) es un estándar promovido por el 3GPP desde noviembre de 2004, sin embargo, su fase de estudio no comenzó si no hasta un mes después, la cual tenía como fin certificar que este estándar podía cumplir con cierto número de objetivos especificados en el reporte técnico TR 25.913 [3] del 3GPP. Después de completar diversas fases de estudio y trabajo, el proceso de estandarización de LTE culminó en marzo de 2009 [4], como se muestra en la figura 1.1.

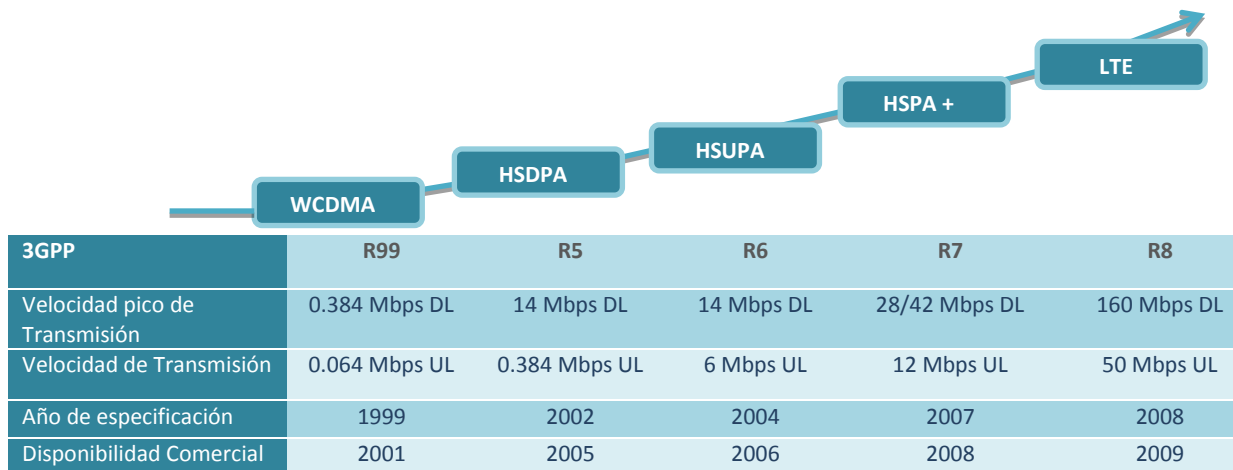


Figura 1.1 Evolución de los sistemas celulares hasta LTE

Fuente: <http://4gtoday.blogspot.com/2008/09/lte-evolution-path.html>



Las tendencias del mercado de las telecomunicaciones, han impulsado la entrada en escena del estándar LTE, el cual brinda nuevas soluciones a los sistemas de comunicación móvil celular y tiene como objetivo incrementar la velocidad de transmisión de datos, reducir la latencia con respecto a la tecnología HSPA y reducir el costo por megabit respecto al Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles² (UMTS, Universal Mobile Telecommunications System) [5]. Uno de los pilares para cumplir con estos objetivos es el uso de las técnicas de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) para el DL y Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Única Portadora (SC-FDMA, *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) para el UL, los cuales permiten obtener una mayor eficiencia espectral con respecto a las redes 3G y proporcionan las condiciones adecuadas para brindar un mayor número de servicios de banda ancha de mejor calidad. Tanto en el DL como en el UL, OFDMA y SC-FDMA crean un sistema robusto frente a la multitrayectoria (desvanecimiento selectivo en frecuencia e interferencia intersimbólica), y además en el UL, este último es más eficiente en el consumo de energía, permitiendo una mayor duración de la batería del terminal móvil [6].

Los esquemas de modulación de orden superior son utilizados para aumentar la velocidad de transmisión de datos. En LTE se implementan los esquemas 16QAM y 64QAM ya que proporcionan un incremento de la velocidad de transmisión de datos. Sin embargo, el uso de estos esquemas de modulación de alto nivel implica constelaciones más complejas y mayor vulnerabilidad al ruido y a la interferencia [7].

Adicionalmente, LTE utiliza un conjunto de técnicas basadas en el uso de múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor (*MIMO, Multiple Input Multiple Output*) que permiten mejorar la calidad y/o la velocidad de transmisión de información con respecto a Sistemas de Única Antena (SISO, *Single Input Single Output*), además, estos sistemas son esenciales para alcanzar un mayor *throughput*³ (160 Mbps en el DL y 50 Mbps en el UL) y lograr alta eficiencia espectral⁴ [8]. En el UL, MIMO es opcional, pero se pueden considerar 3 tipos de técnicas asociadas: diversidad en recepción en el eNodeB, único usuario MIMO y MIMO multiusuario [9]. En el DL, LTE utiliza una configuración base de 2 antenas

² UMTS también se conoce como WCDMA, en donde el primero de estos es utilizado en Europa.

³ Es la cantidad total de información por unidad de tiempo que fluye a través de un canal de comunicaciones y llega satisfactoriamente a su destino, incluye información de usuario, de ancho de banda y de señalización.

⁴ Parámetro que define el número de bits por segundo que se pueden transmitir por cada Hz dentro de una determinada banda de frecuencia.



en transmisión y 2 en recepción (MIMO 2x2), así como también configuraciones opcionales como MIMO 4X4 [10].

El estándar LTE ofrece diversas posibilidades en cuanto a frecuencias de operación, como se muestra en las tablas 1.1 y 1.2, convirtiendo a LTE en el estándar con mayor flexibilidad espectral del mercado de las telecomunicaciones. La asignación y adjudicación de estas porciones del espectro radioeléctrico requiere permiso previo, expreso y otorgado por las entidades gubernamentales de cada país.

Tabla 1.1 Bandas de operación-Modo FDD⁵

Bandas de Operación	Nombre (3GPP)	Enlace de Subida (MHZ)	Enlace de Bajada (MHZ)	Disponibilidad en Colombia
1	2100	1920-1980	2110-2170	
2	1900	1850-1910	1930-1990	✓
3	1800	1710-1785	1805-1880	
4	AWS ⁶	1710-1755	2110-2155	✓
5	850	824-849	869-894	
6	800	830-840	875-885	
7	2600	2500-2570	2620-2690	✓
8	900	880-915	925-960	
9	1700	1749.9-1784.9	1844.9-1879.9	
10	1700/2100	1710-1760	2110-2170	
11	1500	1427.9-1447.9	1475.9-1495.9	
12	US700	698-716	728-746	
13	US700	777-787	746-756	
14	US700	788-798	758-768	
15	US700	704-716	734-746	

⁵ Duplexación por División de Frecuencia.

⁶ Servicios Inalámbricos Avanzados (AWS, *Advanced Wireless Services*).



Tabla 1.2 Bandas de operación-Modo TDD⁷

Bandas de Operación	Nombre (3GPP)	UL (MHZ)	DL (MHZ)
33	UMTS TDD1	1900-1920	1900-1920
34	UMTS TDD2	2010-2025	2010-2025
35	US 1900 UL	1850-1910	1850-1910
36	US 1900 DL	1930-1990	1930-1990
37	US 1900	1910-1930	1910-1930
38	2600	2570-2620	2570-2620
39	UMTS TDD	1880-1920	1880-1920
40	2300	2300-2400	2300-2400

Fuente: http://ieeeboston.org/presentations_society/lte_epc_ieee_comsoc_rao_april_8_2010.pdf

En Colombia, los organismos reguladores del espectro son el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC) y la Agencia Nacional del Espectro (ANE), los cuales otorgan el permiso de uso del espectro siempre y cuando esté coordinado con las políticas del MINTIC, no genere interferencias sobre otros servicios, sea compatible con las tendencias internacionales del mercado, no afecte la seguridad nacional, y contribuya al desarrollo sostenible [11].

El MINTIC ha trabajado en ampliar la asignación de las licencias para el uso del espectro radioeléctrico en Colombia para prestar servicios de Internet móvil de alta velocidad a través del estándar LTE, de esta manera la ANE y el MINTIC otorgarán permisos para el uso y explotación de hasta 225 MHz de espectro radioeléctrico de las bandas 1900 MHz, AWS y 2600 MHz en diciembre de 2012 [12]. Actualmente, la empresa UNE comunicaciones tiene asignado 50 MHz de espectro en la banda de 2600 MHz, con lo cual se encuentran implementando la primera fase de la red LTE en las principales ciudades del país [13].

La especificación técnica TS 36.101 provee las diferentes combinaciones de anchos de banda y bandas de frecuencia disponibles para el estándar LTE [14]. La tabla 1.3 se enfoca únicamente en las combinaciones concernientes a las bandas

⁷ Duplexación por División de Tiempo



4, 7 y 8, sobre las cuales se hizo énfasis durante el desarrollo de este trabajo de grado. Se trabajó con las bandas 4 y 7 dada la subasta planeada en estas bandas para este año en Colombia, y con la banda 8 con el fin de establecer la incidencia específicamente en el radio de la celda al hacer uso de altas (bandas 4 y 7) y bajas frecuencias (banda 8).

Tabla 1.3 Anchos de banda disponibles según la banda de frecuencia

Banda E-UTRAN	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7			✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓		

1.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El 3GPP definió una arquitectura de red completamente nueva para LTE denominada Sistema Evolucionado de Paquetes (*EPS, Evolved Packet System*). Con respecto a las arquitecturas anteriores, EPS ofrece diversos beneficios dentro de los cuales se encuentran: baja latencia en datos de plano de usuario y de control, soporta despliegues FDD y TDD al igual que trasposos (*handover*) e itinerancia (*roaming*), mayor flexibilidad espectral y reducción del costo por bit [15].

La arquitectura EPS está compuesta por: el Equipo de Usuario (*UE, User Equipment*), la Red de Acceso Radio UMTS Evolucionada (*E-UTRAN, Evolved UMTS Radio Access Network*), el Núcleo de Paquetes Evolucionado (*EPC, Evolved Packet Core*) y las plataformas de servicio como el Subsistema Multimedia IP (*IMS, IP Multimedia Subsystem*) y acceso a otras redes.

1.2.1 E-UTRAN Incluye diversas funcionalidades de la interfaz radio que mejora potencialmente el desempeño de la red en ciertos entornos. La diferencia principal con respecto a UTRAN (*Release 7*) es la fusión de los elementos NodoB y el Controlador de la Red Radio (*RNC, Radio Network Controller*) en una única entidad de red denominada NodoB Evolucionado (*eNodeB, Evolved NodeB*).



La arquitectura E-UTRAN se compone de varios eNodeB interconectados entre sí a través de la interfaz X2 y se encuentra conectada con EPC a través de la interfaz S1.

- eNodeB: Definido en términos de funcionamiento como el punto de acceso a la red de comunicación móvil celular, este elemento de red se encuentra directamente conectado a los enrutadores de la red sin necesidad de ningún intermediario. Este elemento de red tiene características adicionales de gran importancia como el control de los recursos radio, gestión de movilidad radio⁸ y el protocolo de nivel 2 de la interfaz radio⁹ [16].

1.2.2 EPC El 3GPP adoptó el término Evolución de la Arquitectura del Sistema (*SAE, System Architecture Evolution*) para referirse a los estudios que tienen como finalidad la especificación de una red troncal evolucionada basada en conmutación de paquetes. Formalmente, a esta red troncal se le denomina EPC y es común encontrarla como sinónimo de SAE [8].

EPC tiene como objetivo principal proporcionar un servicio de conectividad IP a través de una arquitectura de red optimizada que permite explotar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN. Otra característica clave es que EPC permite que sus servicios sean accesibles tanto por las redes de acceso 3GPP (E-UTRAN, UTRAN, GERAN¹⁰) como las no 3GPP (WiMAX, CDMA2000, 802.11)¹¹ [2].

Los elementos que lo conforman son [17]:

- Entidad de Gestión de Movilidad (*MME, Mobility Management Entity*): El MME es el encargado de establecer una conexión lógica directa con el UE, dicha conexión se utiliza como canal de control principal entre dicho equipo y la red. Al ser MME el nodo principal de control del EPC, se convierte en el responsable de realizar importantes funciones, incluyendo la gestión de

⁸ Medida de procesamiento y decisiones relacionadas con traspaso.

⁹ Nivel de enlace de datos del modelo OSI, garantiza la transferencia de información entre las entidades de red, esto implica detección y la posible corrección de errores que pueden ocurrir a nivel de capa física.

¹⁰ Red de Acceso Radio GSM EDGE (GERAN, *GSM EDGE Radio Access Network*).

¹¹ Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (WiMAX, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*), Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, *Code Division Multiple Access*), Conjunto de estándares IEEE 802.11.



autenticación y autorización de los UEs a través de la interacción con el Servidor de Usuario Local (HSS, *Home Subscriber Server*) y facilita el acceso de estos equipos a la red para obtener conectividad IP. Además, trabaja en conjunto con el HSS y la Red de Acceso Radio (RAN, *Radio Access Network*) para decidir la estrategia apropiada de la gestión de los recursos radio, permitiendo así la prestación de servicios a usuarios de otros sistemas LTE y redes antiguas. Asimismo, se encarga de la gestión de movilidad de los UEs que se encuentran en un modo pasivo (*idle*), los cuales son rastreados con cierta frecuencia dentro de un área de seguimiento [17].

- Pasarela en Servicio (SGW, *Serving Gateway*): El SGW realiza el enrutamiento, organización y el reenvío de los paquetes de datos, además actúa como elemento fundamental de movilidad tanto del plano de usuario (durante los traspasos entre eNodeB) como de la convergencia de LTE y otras tecnologías 3GPP. Esta entidad es parte de la infraestructura de red del operador y es responsable de sus propios recursos, los cuales son asignados con base en las peticiones del MME, de la red de Datos de Paquetes (PDN-GW, *Packet Data Network Gateway*) o de la Función de Políticas y Tarificación de Recursos (PCRF, *Policy Charging and Rules Functions*), que a su vez actúan en función de la necesidad de crear, modificar o eliminar recursos para el UE. Adicionalmente, se encarga de recoger la información de usuario necesaria para la contabilidad y el cobro al usuario [17].
- Red de Datos de Paquetes (PDN-GW, *Packet Data Network Gateway*): Se considera la puerta de enlace del tráfico con otras redes, en donde cada usuario puede acceder a más de una PDN-GW, proporcionando conectividad e intercambio de información con redes externas como Internet y el Subsistema Multimedia IP (IMS, *IP Multimedia Subsystem*). Asigna las direcciones IP a los equipos de usuario y define políticas de calidad del servicio y tarificación que se aplican al tráfico de usuario entre el PCRF y el PDN-GW. Adicionalmente, habilita la movilidad entre los sistemas de acceso 3GPP y los diferentes a ellos [17].
- HSS: Es el sistema responsable tanto de la actualización como de la base de datos que contiene toda la información acerca de los suscriptores pertenecientes a la red, convirtiéndose así en la base de datos principal de la red ya que incorpora funciones del Registro de Llamada Local (HLR, *Home Location Register*) y del Centro de Autenticación (AuC, *Authentication Centre*) [17].

- **Función de Políticas y Tarificación de Recursos (PCRF, *Policy Charging and Rules Functions*):** Es el responsable de las funciones de control relacionadas con la tarificación basada en el flujo de datos de usuario y también de las decisiones relacionadas con las políticas de control. Además, provee el control de la red en términos de Calidad de Servicio (*QoS, Quality of Service*), tarificación basada en el tráfico y detección del servicio de información. Adicionalmente, el PCRF autoriza la asignación de recursos de QoS y provee reglas relacionadas con la tarificación [17].

La figura 1.2 muestra la convergencia de todos los elementos de red mencionados anteriormente en un solo sistema denominado arquitectura de red de LTE.

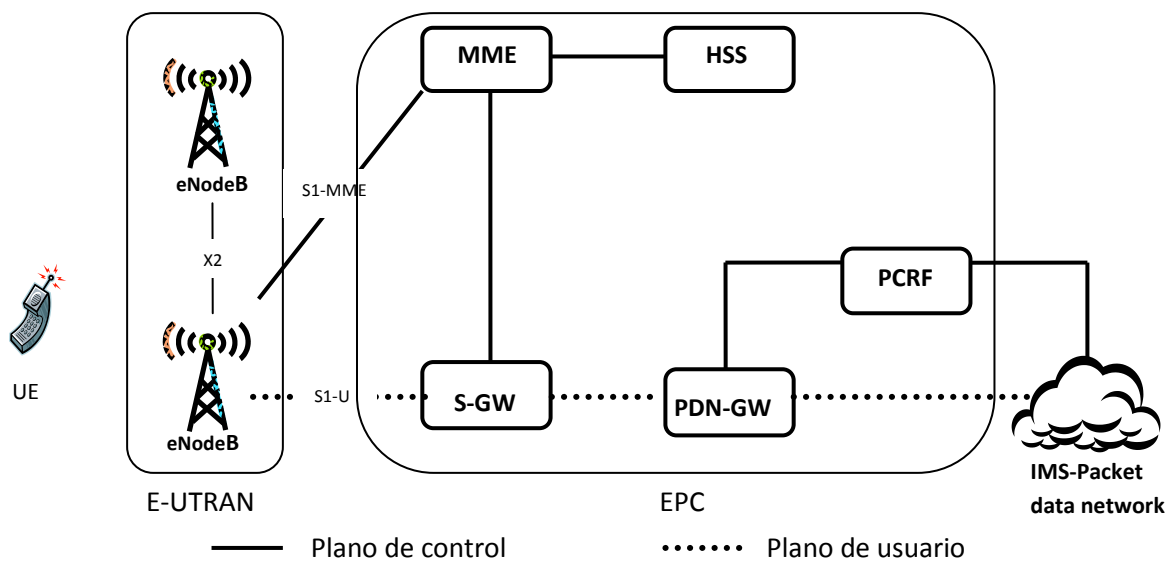


Figura 1.2 Arquitectura de red

La implementación de la arquitectura de red LTE se realiza de una manera más simple que en las arquitecturas existentes, esto debido a que en LTE se realiza una separación del plano de control y de usuario a través de un único elemento de red ubicado en el plano de control, mientras que en las redes GSM/ CDMA ambos planos se distribuyen a través de múltiples elementos de red, como se muestra en la figura 1.3 [18]. Además, en la figura 1.4 se evidencia detalladamente dicha separación en la arquitectura LTE.

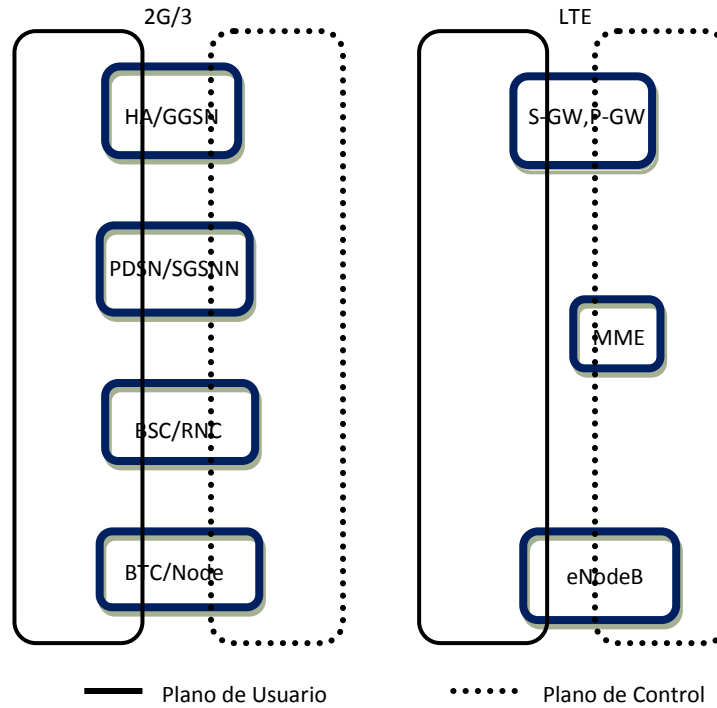


Figura 1.3 Comparación del plano de control y de datos 2G/3G y LTE

Fuente: H. Holma y A. Toskala, “*LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*”

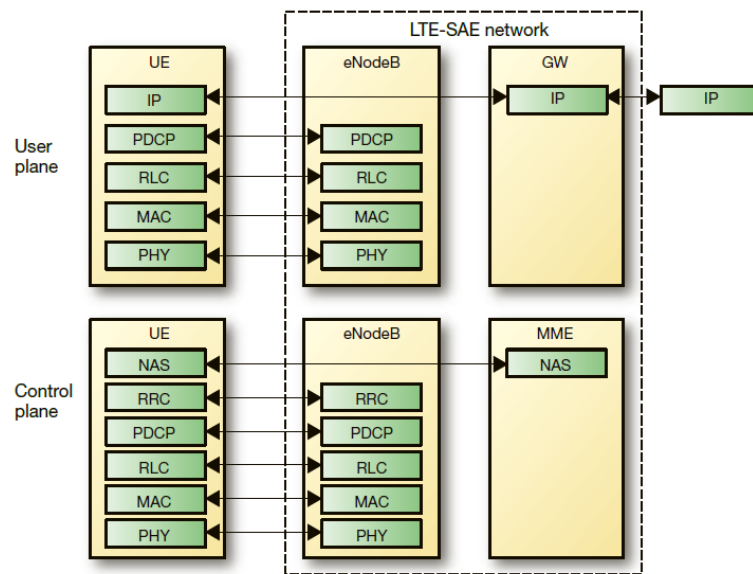


Figura 1.4 Arquitectura de protocolos de la interfaz radio LTE

Fuente: www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2007_03/files/5_LTE_SAE.pdf



1.3 PLANEACIÓN DE LA RED RADIO LTE

La implementación física de una red móvil celular es el resultado final de un proceso completo de planeación realizado por proveedores de telecomunicaciones, en el cual se analizan distintos parámetros que permiten determinar la infraestructura necesaria para el despliegue de la red, los espaciamientos entre las estaciones base y los recursos radio para cada estación base. El objetivo principal de la planeación es encontrar el punto óptimo entre calidad, capacidad y cobertura con la menor inversión posible, es decir, teniendo en cuenta factores técnicos, económicos y comerciales.

Dentro de las ventajas que trae consigo este proceso están: mitigar los efectos de la interferencia, reducir las limitaciones de movilidad de los usuarios, sintetizar el diseño de la red de acuerdo a los requisitos del servicio y comparar diferentes alternativas de solución que permitan cumplir con el objetivo principal de la planeación celular [19].

1.4 PROCESO DE PLANEACIÓN CELULAR

El proceso de planeación, cuenta con los siguientes pasos:

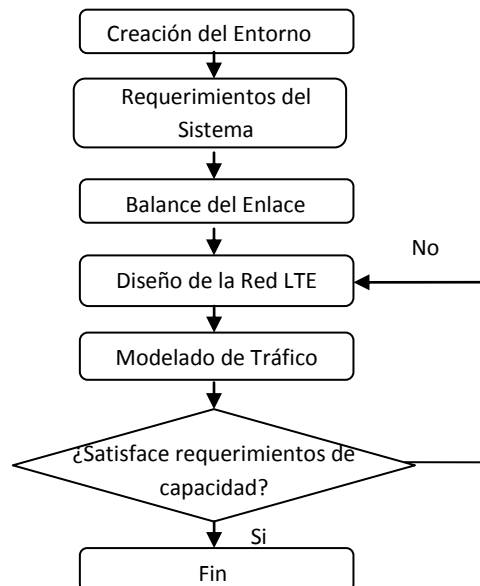


Figura 1.5 Proceso de planeación de una red

Fuente: <http://es.scribd.com/doc/92351478/11-LTE-Radio-Network-Planning-Introduction>



1.4.1 Creación del Entorno Las características topográficas del terreno son de gran relevancia para el diseño y posterior despliegue de la red ya que brindan las condiciones iniciales que afectan de forma directa la propagación radioeléctrica. Para empezar con el proceso de planeación es necesario obtener los mapas digitales que proporcionarán los datos geográficos del área donde se implementará la red, los cuales son necesarios para realizar cálculos de pérdidas y predicciones de cobertura.

Los entornos de planeación se crean a partir de distintas clases de mapas que deben tener información tanto de altitud como de los diferentes tipos de terreno (*clutter*) que conforman el área a planear, además es posible complementar dicho entorno con mapas tipo *raster* que contienen información de altura de edificios y con aquellos que brinden información sobre carreteras [20].

1.4.2 Definir Requerimientos del Sistema El operador móvil contrata los servicios del proveedor para concertar: los objetivos de capacidad, cobertura y QoS de la red a implementar, *throughput*, velocidad de transmisión objetivo, tipos de movilidad del UE, eficiencia espectral, objetivo de desempeño en el borde de la celda, entre otros [21]. Además, es función del operador contar con los datos necesarios que servirán como entrada para el dimensionamiento de la red, dicha información comprende distintos parámetros como: frecuencia de operación, tipos de antenas, número de suscriptores, perfil de tráfico por suscriptor, información sobre sitios ya existentes (2G/3G) y parámetros de entrada para el balance del enlace o *Link Budget* [22].

1.4.3 Balance del Enlace Denominado también *Radio Link Budget*, tiene como objetivo encontrar las máximas pérdidas permitidas por trayecto entre un eNodeB y un móvil situado en el borde de la celda bajo las peores condiciones de un enlace radio en los dos sentidos de la comunicación. Las máximas pérdidas de propagación de la señal permiten estimar el rango máximo de la celda utilizando un modelo de propagación adecuado. Con el rango de la celda se obtiene el número de estaciones base requeridas para cumplir con el objetivo de cobertura señalado en los requerimientos del sistema planteados previamente [23].

La elección correcta de un modelo de propagación se realiza de acuerdo a los diferentes parámetros del entorno de trabajo, tales como: la frecuencia de operación, distancia, condiciones atmosféricas, tipo de celda, tipo de escenario de



despliegue, entre otros. Los modelos de propagación más utilizados son: espacio libre, Walfish–Ikegami, Okumura–Hata, Cost-Hata, Longley–Rice [24]. La tabla 1.4 resume los rangos de parámetros a tener en cuenta para la elección de un modelo de propagación, teniendo en cuenta solo los modelos más utilizados.

Tabla 1.4 Elección del modelo de propagación

	Okumura-Hata	Cost-Hata	Walfish-Ikegami	Longley-Rice
Frecuencia [MHz]	100-1500	1500 -2000	800-2000	20-20000
Distancia [Km]	1-20	1-20	0.02-5	1-2000
Altura BS [m]	30-200	30-200	4-50	0.5-3000
Altura antena del móvil [m]	1-10	1-10	1-3	-
Tipo de Celda	Macro	Macro	Micro	Macro

Fuente: biblioteca.cicese.mx/catalogos/tesis/download.php?id=15814

1.4.4 Diseño de la Red LTE para Popayán Teniendo en cuenta el radio de la celda que arrojó el proceso del balance del enlace, se inicia el proceso de ubicación de los sitios de una forma estratégica con el fin encontrar el punto geográfico óptimo que permita alcanzar la mejor cobertura.

Es importante tener en cuenta que existe el riesgo de encontrar lugares en los que no sea posible la ubicación real de los sitios debido a factores de salud, ambientales, políticos, legales, económicos y culturales, así como también impedimentos por concepto de propiedad privada. Lo anterior se debe considerar antes de iniciar con el proceso de diseño ya que cualquier modificación de la ubicación de los sitios afecta el diseño anteriormente planteado.

1.4.5 Modelado de Tráfico El modelado de tráfico es un paso de gran importancia dentro de la planeación de redes, en la que se estudia la capacidad de la red teniendo en cuenta la distribución de los usuarios en el entorno, el tipo de servicio que demandan y los recursos disponibles en la red. Para llevar a cabo este estudio, es necesario importar o crear un mapa de tráfico que reúna parámetros como ancho de banda LTE elegido, perfil de usuario, tipos de movilidad, número de usuarios o *throughput* por celda y características de tráfico relacionadas con los diferentes servicios. Esta información se basa en estadísticas de mercado del operador y permite predecir el comportamiento de la red de una



manera más realista y con ella crear los mapas de tráfico teniendo en cuenta el tipo de información suministrada por los operadores.

- Mapa de tráfico por sector en caso de que los datos provengan del Centro de Operación y Mantenimiento¹² (*OMC, Operation and Maintenance Centre*).
- Mapa de tráfico por perfil de usuario si se cuenta con información de tráfico basada en estadísticas de mercado, es decir, estadísticas sobre la cantidad de usuarios por servicio.
- Mapa de tráfico por densidad (número de usuarios por Km²) si se tiene información de tráfico basada en estadísticas poblacionales o de redes predecesoras como 2G o 3G. Este mapa tiene como entrada la densidad de usuarios por Km².

Después de la creación del mapa de tráfico, la herramienta de planeación calcula varios parámetros como cargas de tráfico en UL y DL, el *throughput* de los usuarios, niveles de ruido, entre otros, lo cual permite realizar el análisis de capacidad de la red diseñada [25].

Tal como se mostró en la figura 1.4, si los requerimientos de capacidad no se cumplen es necesario aumentar el número de sitios, lo cual implica cambiar el diseño. Este procedimiento se realiza hasta que se cumplan los requerimientos de capacidad previamente establecidos.

¹² Maneja los mensajes de error originados en la red. Tiene acceso al EPC, se encarga de tareas como tarificación, operación de la red, gestión de seguridad, etc. Además, recolecta datos de todas las celdas de la red, estos datos incluyen número de usuario y *throughput* por celda.



2. PLANEACIÓN DE UNA RED LTE PARA LA CIUDAD DE POPAYÁN

En este capítulo se describen en detalle los pasos mencionados en el capítulo 1 para la planeación de una red móvil. En la primera parte de este capítulo, se utilizó la herramienta de planeación RF Atoll 2.8.0 de Forsk para la creación del entorno de trabajo. En la segunda se determinó teóricamente el balance del enlace, el radio de la celda y el número de sitios necesarios para satisfacer los requerimientos de capacidad y cobertura.

2.1 ACERCA DE ATOLL

Atoll es una plataforma para diseño y optimización de redes móviles, que soporta tecnologías como GSM, UMTS, HSPA, LTE, WiMAX, entre otras. Creada por una compañía independiente conocida en el mercado como Forsk, Atoll ha brindado soluciones a la industria inalámbrica desde 1987, ofreciendo soporte a los operadores móviles durante el ciclo de vida de la red, desde su diseño inicial hasta su optimización [26].

Atoll en su versión 2.8.0 presenta una serie de características destacadas como [26]:

- Características avanzadas en el diseño de la red: Incorpora un motor de cálculo de propagación de alto desempeño, permite importar o crear mapas de tráfico para múltiples servicios, planificación automática de frecuencias, entre otras.
- Plataforma flexible: Atoll soporta ambientes multi-usuario a través de una base de datos que provee compartición de datos e integridad de los mismos.

Atoll cuenta con diferentes módulos de acuerdo a la tecnología de la red que se va a implementar. Para el módulo LTE, Atoll ofrece diversas funcionalidades como [26]:

- Modelado de parámetros radio y de la red: Atoll trabaja en diversas bandas de frecuencia y anchos de banda de canal. Soporta los métodos de duplexación TDD y FDD, las técnicas de acceso OFDMA y SC-FDMA y cuenta con múltiples esquemas de modulación y codificación, además, permite el modelado de sistemas MIMO (MU-MIMO, SU-MIMO).
- Modelado de tráfico: modela servicios de voz y de datos, permite crear mapas de tráfico para múltiples servicios y modela tráfico por suscriptor.
- Simulación: basados en los resultados de la simulación se generan escenarios de predicción como: cobertura de la red y de la celda,



interferencia en el UL y DL, predicción por portadora en UL y DL, predicción de cobertura con respecto al *throughput* en UL y DL, escenario de predicción por indicador de calidad en el UL y DL y planeación de capacidad.

2.2 CREACIÓN DEL ENTORNO

Atoll soporta diversos tipos de información geográfica y permite trabajar con cada uno de ellos en un mismo documento. Se pueden importar o crear Mapas Digitales de Elevación (DEM, *Digital Elevation Model*), de tipos de *clutter*, de población, de tráfico y fotografías con el fin de brindarle al proceso de diseño y planeación de la red, cálculos más realistas [27].

- DEM: Describe la elevación del terreno sobre el nivel del mar. El DEM es tomado en cuenta por el modelo de propagación automáticamente durante los cálculos que realiza Atoll. Los formatos para DTM soportados por Atoll son: TIF (8 o 16-bit), BIL (8 o 16-bit), IST (8 o 16-bit), Planet, BMP (8-bit), GRD/GRC Vertical Mapper (8 o 16-bit), y Erdas Imagine (8 o 16-bit).
- Mapa de clases: Cada pixel contiene un código de 256 posibles, que corresponden a un determinado tipo de *clutter* o tipo de terreno. Este tipo de información geográfica es utilizada por el modelo de propagación durante los cálculos que realiza la herramienta. Los formatos de datos geográficos soportados por la herramienta son los ya mencionados en el ítem anterior.
- Mapa de población: Contiene información de la densidad de población o el número total de habitantes. Estos mapas pueden ser utilizados para determinar el número absoluto o relativo de la población dentro del área de cobertura, sin embargo, estos no tienen efecto en los resultados de predicción y simulación. Los formatos soportados para mapas de población son: AGD, DXF, SHP, MIF, TAB, además de los ya mencionados.
- Mapa de tráfico: Contiene información de capacidad y uso del servicio por área geográfica, estos mapas son utilizados para analizar la capacidad de la red. Formatos soportados: TIF (8 o 16-bit), BIL (8 o 16-bit), IST (8 o 16-bit), Planet, BMP (8-bit), GRD/GRC Vertical Mapper (8 o 16-bit), y Erdas Imagine (8 o 16-bit).
- Fotografías: Son datos geográficos que representan mapas de carreteras o imágenes satelitales para ofrecer una mayor precisión al entorno de trabajo. No tienen efecto en los cálculos realizados por Atoll. Formatos soportados: TIF (1 a 24-bit), BIL (1 a 24-bit), IST (1 a 24-bit), BMP (1 a 24-bit), Planet, Erdas Imagine (1 a 24-bit), GRC Vertical Mapper (1 a 24-bit), y ECW (8 o 24-bit).



La ciudad de Popayán, ubicada al suroccidente del territorio Colombiano, se convirtió en el escenario elegido para desarrollar este trabajo de grado y por ende la base para la creación del entorno.

Para crear el entorno de trabajo en Atoll, se importó un mapa de elevación y un mapa de clases formado a partir de los diferentes *clutters* de la ciudad: zona húmeda, zona urbana, zona verde y montañas, césped y planicie. Adicionalmente, se importó un mapa de la malla vial con el fin de mejorar la visualización del escenario de trabajo, este mapa contiene información detallada acerca de las vías de la ciudad y de los sitios más conocidos y frecuentados de la misma.

La información topográfica y de relieve de la zona de trabajo contenida en el mapa de elevación resulta muy importante para la simulación, ya que la irregularidad del terreno de la ciudad de Popayán afecta de manera relevante los cálculos de cobertura y propagación que realiza la herramienta. En la figura 2.1 se aprecia el mapa de altitudes utilizado en la creación del escenario de planeación.

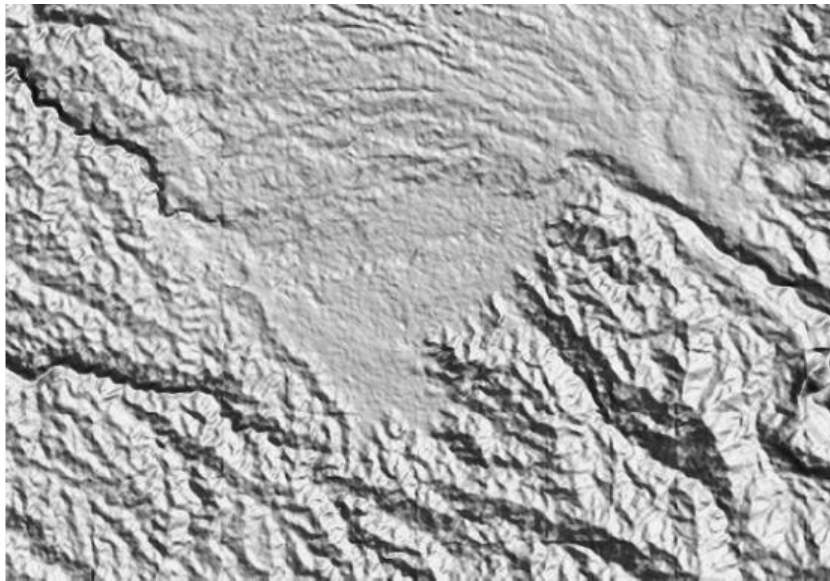


Figura 2.1 Mapa de elevaciones de Popayán

La figura 2.2 muestra el mapa de tipos de terreno con los respectivos *clutters* correspondientes a la ciudad, en donde, para Popayán se tiene 5 de estos: zona húmeda (color azul), zona urbana (color amarillo), zona verde y montañas (verde oliva), planicie (verde oscuro) y pasto (verde claro).

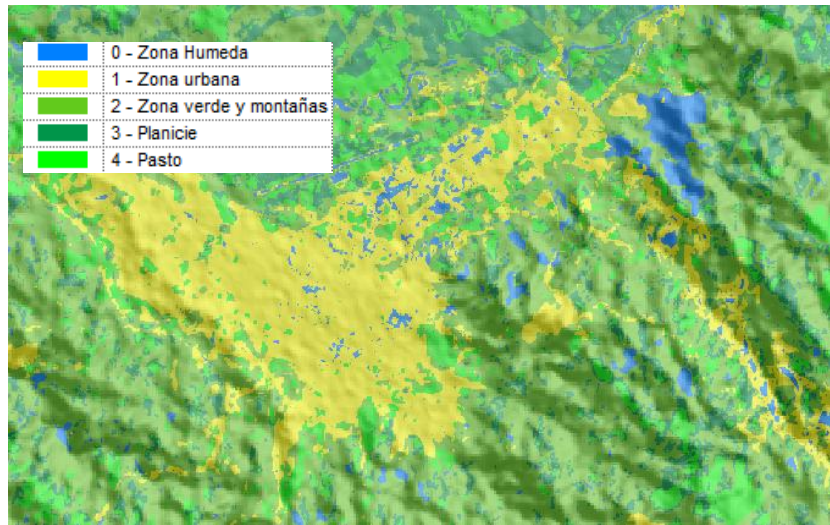


Figura 2.2 Mapa de *clutters* de Popayán

En la figura 2.3 se muestra el mapa de la malla vial de la ciudad de Popayán, utilizado con el fin de mejorar el escenario y ubicar los sitios de manera precisa.

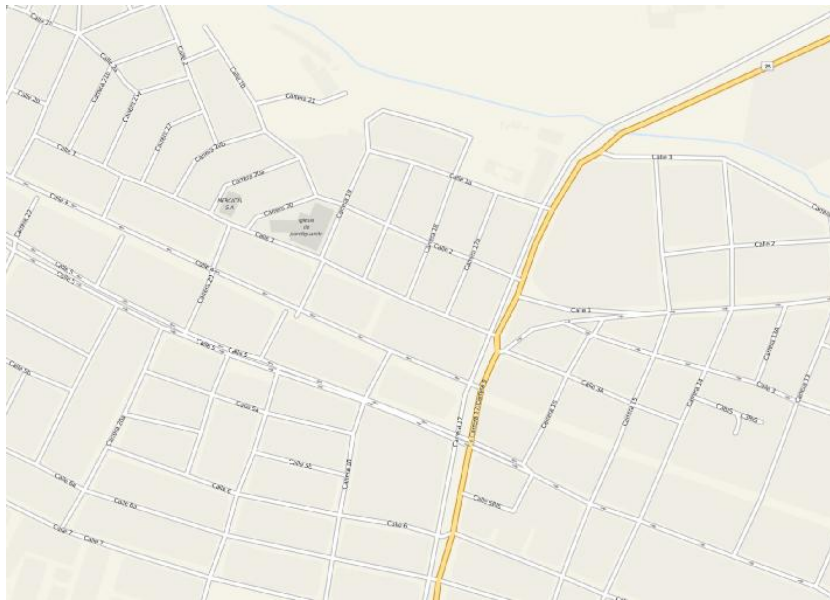


Figura 2.3 Mapa malla vial de Popayán

Atoll permite ubicar todos estos tipos de mapas de una manera conjunta, superponiéndolos, para obtener de esta forma el entorno final de trabajo, en donde



los colores verdes y azul representan los tipos de terreno y el color gris la malla vial de la ciudad. Dicho escenario se puede observar en la Figura 2.4.

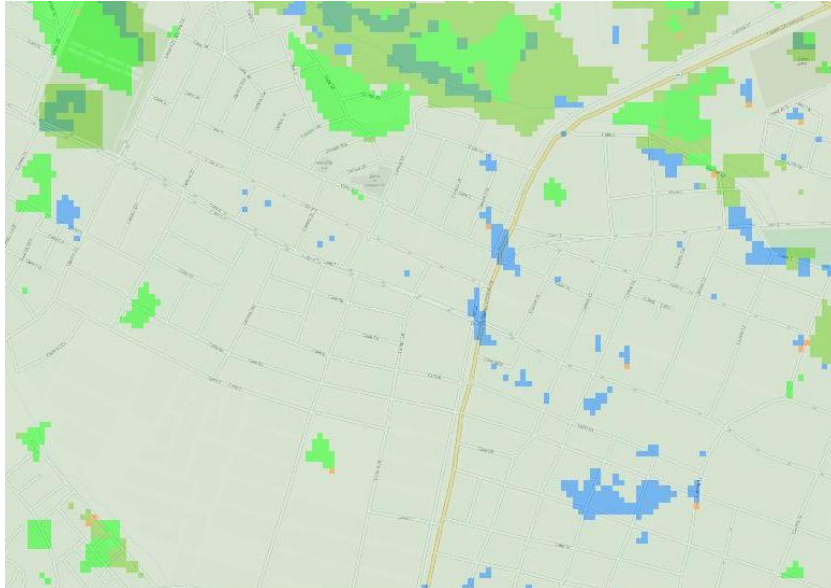


Figura 2.4 Entorno final de trabajo

2.3 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Los requerimientos de diseño de una red móvil, deben ser definidos antes de iniciar con el proceso de planeación de la red que se pretende desplegar. En este apartado se dividen los requerimientos del sistema en: velocidad de transmisión objetivo, tipos de movilidad del UE, requerimientos de cobertura y requerimientos de capacidad. Lo anterior con el fin de realizar un diseño completo y eficiente de la red móvil LTE para Popayán.

2.3.1 Velocidad de Transmisión de Datos Objetivo LTE puede alcanzar diferentes valores pico de velocidad de transmisión de datos dependiendo del Ancho de Banda (*BW, Bandwidth*) y de los Esquemas de Modulación y Codificación (*MCS, Modulation and Coding Schemes*) empleados.

Las tablas 2.1 y 2.2 muestran las velocidades pico de transmisión de datos, correspondientes a las diferentes combinaciones de MCS y BW para el UL y DL respectivamente.



Tabla 2.1 Velocidades pico en Mbps para el DL

MCS	η	MIMO	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
			RB=6	RB=15	RB=25	RB=50	RB=75	RB=100
QPSK 1/2	1	1x1	0.95	2.37	3.96	7.92	11.89	15.85
QPSK 1/3	0.66	1x1	0.62	1.56	2.61	5.23	7.84	10.46
16QAM1/2	2	1x1	1.90	4.75	7.92	15.85	23.78	31.71
16QAM3/4	3	1x1	2.85	7.13	11.89	23.78	35.68	47.57
16QAM1/1	4	1x1	3.80	9.51	15.85	31.71	47.57	63.43
64QAM3/4	4.5	1x1	4.28	10.70	17.84	35.68	53.52	71.36
64QAM5/6	5	1x1	4.75	11.89	19.82	39.64	59.46	79.29
64QAM1/1	6	1x1	5.70	14.27	23.78	47.57	71.36	95.14
64QAM3/4	9	2x2	7.63	19.09	31.83	63.66	95.49	127.33
64QAM5/6	10	2x2	8.48	21.22	35.37	70.74	106.11	141.48
64QAM1/1	12	2x2	10.18	25.46	42.44	84.88	127.33	169.77

Bloque de Recursos (RB, *Resource Block*)¹³.
 η : eficiencia espectral.

Tabla 2.2 Velocidades pico en Mbps para el UL

MCS	η	MIMO	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
			RB=6	RB=15	RB=25	RB=50	RB=75	RB=100
QPSK 1/2	1	1x1	0.92	2.31	3.85	7.71	11.56	15.42
QPSK 1/3	0.66	1x1	0.61	1.52	2.5	5.09	7.63	10.18
16QAM1/2	2	1x1	1.85	4.62	7.71	15.42	23.13	30.85
16QAM3/4	3	1x1	2.77	6.94	11.56	23.13	34.7	46.27
16QAM1/1	4	1x1	3.7	9.2	15.4	30.8	46.2	61.7
64QAM3/4	4.5	1x1	4.1	10.4	17.3	34.7	52.06	69.4
64QAM5/6	5	1x1	4.6	11.5	19.2	38.5	57.8	77.1
64QAM1/1	6	1x1	5.5	13.8	23.1	46.2	69.4	92.56

Para determinar estos valores de velocidad, es necesario conocer el número de bits por símbolo, el cual depende del esquema de modulación empleado: QPSK ($T_s=2T_b$), 16QAM ($T_s=4T_b$), 64QAM ($T_s=6T_b$), para después determinar la eficiencia espectral, valor que es obtenido por la relación indicada en la ecuación 2.1 [28].

¹³ Agrupación de 12 subportadoras que ocupan 180 KHz y 0.5ms.



$$\eta \left[\frac{\text{bps}}{\text{Hz}} \right] = \frac{T_s}{T_b} \times \text{TasaCodificación} \quad (2.1)$$

Donde:

η : eficiencia espectral

T_s : tasa de símbolo

T_b : tasa de bit

Para ilustrar el proceso, como ejemplo se determinó la velocidad para un BW igual a 5MHz y un MCS de 16QAM 3/4. Reemplazando en la ecuación 2.1, la eficiencia espectral que arroja este MCS es de 3 bps/Hz, así:

$$\eta = \frac{4T_b}{T_b} \times \frac{3}{4} = 3 \left[\frac{\text{bps}}{\text{Hz}} \right]$$

Una vez obtenido este valor, se procede a multiplicarlo por el ancho de banda, el cual resulta del producto entre el número de RB asignados a cada ancho de banda y 180 KHz que representa el ancho de banda de cada RB, como lo indica la ecuación 2.2.

$$\text{Velocidad} = \eta \times (\text{RB} \times 180_{\text{KHz}}) \quad (2.2)$$

$$\text{Velocidad} = 3_{\text{bps/Hz}} \times (25 \times 180_{\text{KHz}}) = 13500 \text{ Kbps}$$

Hasta este punto, tanto para el UL como para el DL se realiza el mismo procedimiento. Para determinar la velocidad neta, en el UL se realiza la siguiente consideración: la diferencia del resultado de la ecuación 2.2 con el 14.3% del mismo, corresponde al valor neto de la velocidad de transmisión que se pretende encontrar, como se indica en la ecuación 2.3. Este porcentaje se toma por la señal de referencia del UL¹⁴, representada en 1 de los 7 símbolos OFDM que componen un intervalo de tiempo (0.5 ms).

$$\text{Velocidad}_{\text{neta}} = \text{Velocidad} \times (1 - 14.3\%) \quad (2.3)$$

¹⁴ Las señales de referencia o símbolos piloto se utilizan para: obtener medidas de calidad en el UL, implementar mecanismos de búsqueda de celda y sincronización inicial.



$$Velocidad_{neta} = 13500 \times (1 - 0.0143) = 11.569 \text{ Mbps}$$

Para el DL, se realizan las siguientes consideraciones [29]:

- Canal Físico de Control del DL (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*): toma 1 símbolo de 14 símbolos. Mínima asignación posible para PDCCH. Control de la Cabecera¹⁵ de la trama: 7.1% (=1/14).
- Señal de Referencia DL: Depende de la configuración de antena. Flujo simple utiliza 2 de 14 símbolos en 1 de cada 3 subportadoras, MIMO 2x2 4 símbolos, y MIMO 4x4 6 símbolos. Control de cabecera: (4.8% - 14.3%).
- Otros símbolos: señal de sincronización, Canal de Difusión Físico (PBCH, *Physical Broadcast Channel*), Canal Físico Indicador de Formato de Control (PCFICH, *Physical Control Format Indicator Channel*), un grupo de Canal Físico Híbrido Indicador de Solicitud de Retransmisión Automática (PHICH, *Physical Hybrid Automatic Repeat Request Indicator Channel*). La cabecera de la trama depende del ancho de banda: menor al 1% en 20 MHz y del 9% en 1.4 MHz.

2.3.2 Tipos de Movilidad del UE E-UTRAN debe soportar movilidad para velocidades bajas (0-15 Km/h), medias (15-120 Km/h) y altas (120-350 Km/h). Estas velocidades se encuentran relacionadas a los corrimientos en frecuencia Doppler de 5 Hz, 70 Hz y 300 Hz respectivamente y varían de acuerdo a las bandas de frecuencia que se empleen, como lo demuestra la tabla 2.3 [30].

Tabla 2.3 Velocidad del UE según los corrimientos de frecuencia Doppler

Banda de Frecuencia	Frecuencias UL (MHz)	Condición de Propagación (Doppler)		
		Velocidad del UE [Km/h]		
		5 Hz	70 Hz	300 Hz
4	1710 - 1755	3.1	44	187
7	2500 - 2570	2.1	30	128
8	880 - 915	6.0	84	361

Los corrimientos en frecuencia Doppler se encuentran ligados a los siguientes modelos de canal: modelo A Peatonal Extendido (EPA, *Extended Pedestrian A model*), modelo A Vehicular Extendido (EVA, *Extended Vehicular A model*) y modelo Típico Urbano Extendido (ETU, *Extended Typical Urban model*),

¹⁵ En la cabecera de la trama se encuentra información tanto de control como de señalización.

definiendo así las condiciones de propagación multitrayectoria, dentro de los cuales se encuentran: EPA 5Hz, EVA 70Hz, ETU 300Hz, entre otros [30].

2.3.3 Requerimientos de Cobertura El objetivo de cobertura se define de acuerdo a ciertas características propias de cada ciudad como el número posible de usuarios LTE (de acuerdo a estadísticas de mercado) y los sectores que generan mayor tráfico a la red móvil. De acuerdo a lo anterior, se estableció el área de cobertura con base en los puntos de mayor fluencia transeúnte y vehicular que presenta Popayán.

En la figura 2.5 se muestra el área de cobertura objetivo (encerrada en el recuadro verde) que tiene una extensión de 4.679 Km² y dentro de la cual se encuentran sitios de alta concurrencia como: el centro histórico, centro comercial Campanario, barrio Campamento, Universidad del Cauca (sector Tulcán y facultad de Ciencias de la Salud), hospital Universitario San José y clínicas aledañas, barrio la Esmeralda, terminal de transportes y alrededores, barrios Santa Clara y Prados del Norte y sector Catay. Es primordial para los operadores cubrir las zonas donde los usuarios podrían presentar mayor demanda de sus servicios en la fase inicial del despliegue.

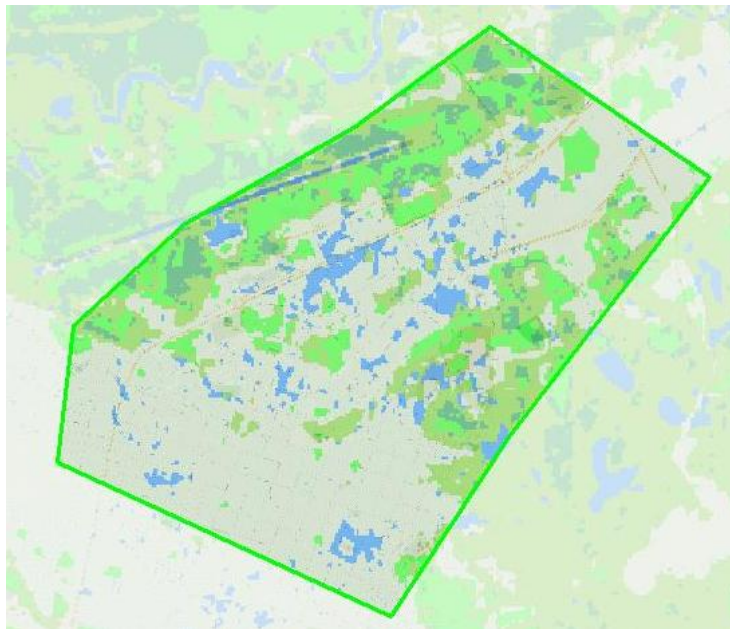


Figura 2.5 Área de cobertura objetivo



2.3.4 Requerimientos de Capacidad El objetivo de capacidad para la red móvil se define de acuerdo a la demanda de altas velocidades de transmisión de datos que buscan satisfacer las necesidades del suscriptor, para este caso se planteó garantizar una velocidad de transmisión por sector de 23 Mbps en el UL y de 35 Mbps en el DL. De acuerdo a lo anterior, se espera lograr una velocidad de transmisión por usuario de aproximadamente 1 Mbps en el UL y 2 Mbps en el DL durante la Hora Pico (BH, *Busy Hour*), si las condiciones de canal son muy buenas.

Debido a que el área de cobertura objetivo corresponde a los lugares de mayor concentración de usuarios suscriptores como la alcaldía, la gobernación, los bancos, instituciones educativas, universidades, clínicas, el hospital y centros comerciales, se infiere que puede existir un número elevado de posibles usuarios LTE inscritos a un mismo operador por lo que se asumió un total de 2400 suscriptores distribuidos a lo largo del área de 4.09Km², para los cuales se asumió un volumen promedio de tráfico por usuario en el mes de 7GB.

2.4 BALANCE DEL ENLACE RADIO

Antes de diseñar la red móvil LTE para la ciudad de Popayán, se realizó el balance de los enlaces UL y DL con el fin de encontrar las máximas pérdidas permitidas y con ellas determinar el radio de la celda de acuerdo al modelo de propagación elegido.

Las máximas pérdidas permitidas consideran diversos parámetros que afectan directamente el balance del enlace tanto para el UL (UE-eNodeB) como para el DL (eNodeB-UE). En las tablas 2.4 y 2.5, se realiza una descripción detallada de la información necesaria para el cálculo de las pérdidas para el UL y DL respectivamente. Los parámetros que se utilizaron fueron tomados de la documentación del R8 contenida en las especificaciones del 3GPP TS 36.104 (UL) y TS 36.101 (DL).



Tabla 2.4 Cálculo de las máximas pérdidas de propagación permitidas para el UL

ID	Parámetro	Valor
a	Potencia Tx [dbm]	23
b	Ganancia Antena UE [dBi]	0
c	Pérdidas por Cuerpo [db]	0
d=a+b-c	PIRE [dBm]	23
e	Figura de Ruido BS [dB]	5
f	Ruido del Terminal [dB]	-101.422
g=e+f	Ruido a la entrada del Rx[dBm]	-96.422
h	Señal a Ruido [dB]	-4.1
i= g+h	Sensibilidad Rx [dBm]	-92.322
j	Margen de Interferencia [dB]	0
k	Pérdidas por Cable [dB]	0
l	Ganancia antena BS [dBi]	17
Lu= d+j+k+l-i	Máximas Perdidas de Propagación Permitidas [dB]	132.22

Tabla 2.5 Cálculo de las máximas pérdidas de propagación permitidas para el DL

ID	Parámetro	Valor
a	Potencia Tx [dBm]	45
b	Ganancia Antena UE [dBi]	17
c	Pérdidas por Cable [dB]	2
d=a+b-c	PIRE [dBm]	60
e	Figura de Ruido UE [dB]	9
f	Ruido del Terminal [dB]	-101.422
g=e+f	Ruido a la entrada el Rx [dBm]	-92.422
h	Señal a Ruido [dB]	17
i= g+h	Sensibilidad Rx [dBm]	-75.422
j	Margen de Interferencia [dB]	0
k	Pérdidas por cuerpo [dB]	0
l	Ganancia Antena BS [dBi]	0
Lu= d+j+k+l-i	Máximas Pérdidas de Propagación Permitidas [dB]	135.422



Donde:

- a: máxima potencia del transmisor [31].
- b: la ganancia del UE depende del tipo de dispositivo y de la banda de frecuencia [29].
- c: P_{tx} se reduce debido a la presencia del usuario (UL) o a los cables en la BS (DL) [29].
- d: Potencia Isótropa Radiada Equivalente (PIRE).
- e: el valor de la figura de ruido depende del diseño a implementar [32].
- f: el ruido del terminal se calcula de la siguiente manera: $k^{16} \times 290(^{\circ}K) \times BW$ [29].
- h: relación entre la Potencia de la Señal y la Potencia de Ruido en Rx.
- j: causado por la interferencia de otros usuarios [33].
- l: el rango de valores de ganancia de antena en la BS es 15-21dbi para antenas sectorizadas [29].

2.4.1 Modelos de Propagación Atoll soporta diversos modelos de propagación utilizados para realizar los cálculos de predicción de cobertura, dentro de los cuales se encuentran: Okumura-Hata, Cost-Hata, Longley Rice, Erceg-Greenstein, ITU 529-3, ITU 526, ITU 370, ITU 1546 y el modelo de propagación estándar. Según los parámetros de la tabla 1.4, los modelos Okumura-Hata y Cost-Hata fueron los más afines a los requerimientos del sistema mencionados en el ítem 2.3, razón por la cual se optó trabajar con ellos para observar su comportamiento en términos de la distancia. A continuación se describen brevemente las ecuaciones de dichos modelos de acuerdo a las características propias de los escenarios de despliegue.

2.4.1.1 Modelo Okumura-Hata El modelo Okumura-Hata basa sus cálculos de propagación en entornos urbanos de acuerdo a la ecuación 2.4:

$$Lu [dB] = 69.55 + 26.16 \log(fc) - 13.82 \log(hbs) - a(hm) + (44.9 - 6.55 \log(hbs)) \log(d) \quad (2.4)$$

Donde:

Lu: pérdidas.

fc: frecuencia portadora [MHz].

hbs: altura efectiva de propagación de la antena del eNodeB [m].

hm: altura efectiva de propagación de la antena del móvil [m].

a(hm): factor de corrección por la altura efectiva de la antena del móvil.

d: distancia entre eNodeB y UE [km].

¹⁶ Constante de Boltzman(k)= $1.3806504 \times 10^{-23}$



El factor de corrección por la altura de la antena del móvil varía en función del tamaño de la ciudad de la siguiente manera:

Ciudades pequeñas y medianas:

$$a(hm) = (1.1 \log(fc) - 0.7) x hm - 1.56 \log(fc) - 0.8 \quad (2.5)$$

Ciudades grandes:

$$a(hm) = 8.29 (\log(1.54 x hm))^2 - 1.1 \quad \text{para } fc < 300 \text{ MHz} \quad (2.6)$$

$$a(hm) = 3.2 (\log(11.75 x hm))^2 - 4.97 \quad \text{para } fc < 300 \text{ MHz} \quad (2.7)$$

Para entornos suburbanos, donde no existen edificaciones, el modelo utiliza la expresión:

$$L = Lu - 2 \left(\log \left(\frac{fc}{28} \right)^2 \right) - 5.4 \quad (2.8)$$

De igual manera, los entornos rurales se rigen por la expresión:

$$L = Lu - 4 (\log(fc))^2 + 18.33 \log(fc) - 40.94 \quad (2.9)$$

2.4.1.2 Modelo Cost-Hata El Modelo Cost-Hata mantiene la misma estructura y características del modelo Okumura-Hata con la particularidad de ampliar su rango de frecuencias hasta los 2000 MHz. Para altas frecuencias como 2600MHz se puede utilizar este modelo siempre y cuando las pérdidas sean compensadas por el incremento de la ganancia de antena [34]. Este modelo se rige por la ecuación 2.10:

$$Lu = 46.3 + 33.9 \log(fc) - 13.82 \log(hbs) - a(hm) + (44.9 - 6.55 \log(hbs)) \log(d) + Cm \quad (2.10)$$

Donde:

C_m : factor de corrección utilizado para adecuar el modelo extendiendo el rango de frecuencias para el que opera el modelo Okumura-Hata.



La tabla 2.6 muestra el valor que toma el factor de corrección según el tamaño del entorno.

Tabla 2.6 Factor de corrección de acuerdo al tamaño de la ciudad

Cm [dB]	Tamaño del entorno
0	Ciudades medianas y áreas suburbanas
3	Grandes centros metropolitanos

2.4.2 Consideraciones sobre el Balance del Enlace El valor de las pérdidas en un enlace radio se ve afectado directamente por la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*), la cual depende de los MCS y del canal de propagación. El balance del enlace para la ciudad de Popayán se calculó para diferentes valores de SNR, con el fin de mostrar la influencia de la SNR sobre las máximas pérdidas permitidas y por ende sobre la distancia.

El cálculo de la distancia se realizó teniendo en cuenta tres bandas de frecuencias diferentes: banda 2600, AWS y 900 con el fin de establecer la diferencia entre utilizar altas y bajas frecuencias. Cabe resaltar que los valores de frecuencia utilizados para este cálculo, fueron los más altos de cada banda para cada uno de los enlaces, debido a que se buscó realizar los cálculos bajo las peores condiciones o las más exigentes.

La tabla 2.7 muestra los datos utilizados para determinar la distancia a partir de las máximas pérdidas permitidas (L_u) calculadas de acuerdo a los parámetros mostrados en las tablas 2.4 y 2.5. Las alturas de las antenas del UE y del eNodeB se asumieron como 1.5m y 30m respectivamente [11] y el factor de corrección utilizado para Popayán corresponde a la ecuación 2.5, por ser una ciudad pequeña.



Tabla 2.7 Parámetros de los modelos Okumura-Hata y Cost-Hata

Parámetros comunes	
Frecuencia portadora UL [MHz]	2570 - 1755 - 915
Frecuencia portadora DL [MHz]	2690 - 2155 - 960
Altura antena UE [m]	1.5
Altura antena eNodeB [m]	30
Factor de corrección para ciudades pequeñas y medianas [dB]	$a(hm) = (1.1\log(fc) - 0.7) \cdot xhm - 1.56\log(fc) - 0.8$
Modelo Okumura-Hata	
Distancia [km]	$10^{\frac{Lu - (69.55 + 26.16\log(fc) - 13.82\log(hb) - a(hm))}{44.9 - 6.55\log(hb)}}$
Modelo Cost-Hata	
Cm: Ciudades medianas [dB]	0
Distancia [km]	$10^{\frac{Lu - (46.3 + 33.9\log(fc) - 13.82\log(hm) - a(hm) + Cm)}{44.9 - 6.55\log(hm)}}$

En la tabla 2.8 se muestran las distancias obtenidas para las diferentes combinaciones entre los MCS y las condiciones de propagación que proporcionan un determinado valor de SNR para el DL, tal como lo indica la especificación técnica TS36.101 del 3GPP [35]. La tabla 2.9 realiza el mismo procedimiento para el UL de acuerdo a la especificación TS 36.104 [36]. Es importante tener en cuenta que LTE no soporta algunas combinaciones de BW y frecuencia de operación, tal como se mostró en la tabla 1.3.

Tabla 2.8 Parámetros y distancia en el DL para 1 antena en recepción

BW [MHz]	Modulación-Codificación	Condiciones de Propagación	SNR [dB]	Pérdidas [dB]	Distancia [Km]		Distancia [Km] (Okumura-Hata)
					(Cost-Hata)		
					Frecuencia de Operación		
					2690 MHz	2155 MHz	960 MHz
1.4	QPSK 1/3	EVA 5Hz	0	164.64	-	5.4	11.6
10	QPSK 1/3	EVA 5Hz	-1.0	156.43	2.55	3.15	6.78
	16QAM 1/2	EVA 5Hz	6.7	148.73	1.54	1.90	4.14
	64QAM 3/4	EVA 5Hz	17.7	137.73	0.75	0.93	2.0
20	64QAM 3/4	EVA 5Hz	17.6	134.82	0.62	0.76	-



Tabla 2.9 Parámetros y distancia en el UL para 2 antenas en recepción

BW [MHz]	Modulación-Codificación	Condiciones de Propagación	SNR [dB]	Pérdidas [dB]	Distancia [Km] (Cost-Hata)		Distancia [Km] (Okumura-Hata)
					Frecuencia de Operación		
					2570 MHz	1755 MHz	915 MHz
1.4	QPSK 1/3	EPA 5Hz	-4.1	152.74	-	3.02	5.52
		EVA 70Hz	-3.9	152.54	-	2.98	5.45
	16QAM 3/4	EPA 5Hz	10.6	138.04	-	1.15	2.11
		EVA 70Hz	4.0	144.64	-	1.77	3.25
5	QPSK 1/3	EPA 5Hz	-4.7	147.14	1.45	2.09	3.83
		EVA 70Hz	-4.5	146.94	1.43	2.06	3.78
	16QAM 3/4	EPA 5Hz	10.4	132.04	0.54	0.78	1.42
		EVA 70Hz	4.3	138.14	0.80	1.16	2.12
10	QPSK 1/3	EPA 5Hz	-4.2	143.63	1.15	1.66	3.04
		EVA 70Hz	-4.1	143.53	1.14	1.65	3.02
	16QAM 3/4	EPA 5Hz	10.8	128.63	0.43	0.62	1.14
		EVA 70Hz	4.5	134.93	0.65	0.94	1.72
20	QPSK 1/3	EPA 5Hz	-4.2	140.62	0.94	1.36	-
		EVA 70Hz	-4.1	140.52	0.94	1.35	-
	16QAM 3/4	EPA 5Hz	11.5	124.92	0.34	0.49	-
		EVA 70Hz	4.2	134.22	0.54	0.79	-

De acuerdo a la tabla 2.9, fue posible observar que a mayor valor de frecuencia, mayores son las pérdidas de propagación. Por otro lado, si la frecuencia de operación empleada es baja, es posible alcanzar mayores distancias que si se utilizan frecuencias altas, tal como se muestra en la figura 2.6.

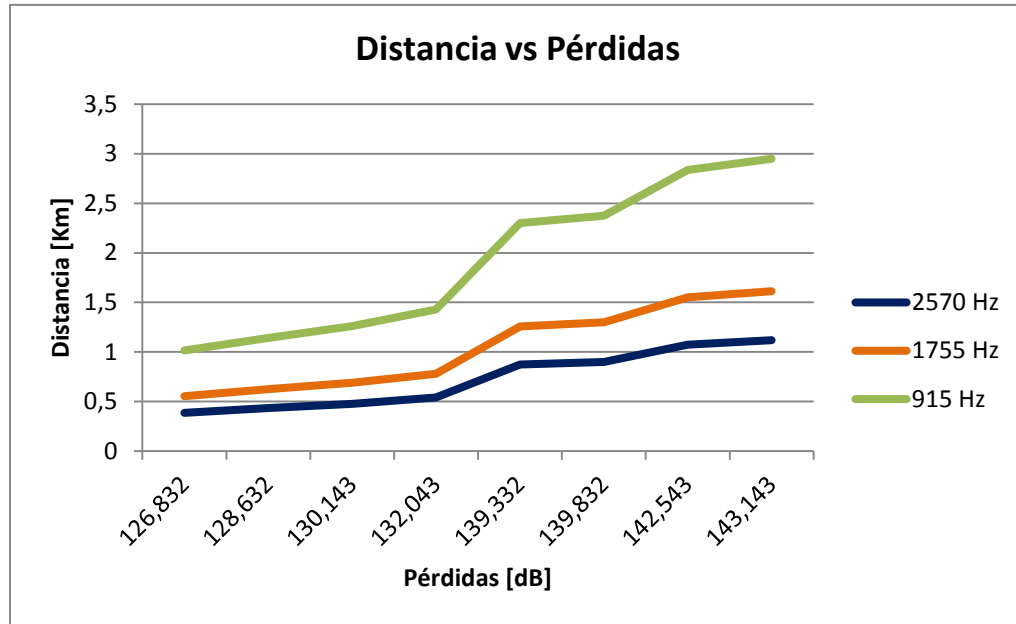


Figura 2.6 Distancia vs Pérdidas

Adicionalmente, en las tablas 2.8 y 2.9 se evidencia el efecto que tiene la SNR sobre las pérdidas de propagación, lo cual indica que a mayor SNR menores son las pérdidas máximas de propagación permitidas. Debido a que el SNR se define como el cociente entre la potencia de la señal y la potencia de ruido [39], cuando la SNR es positiva, implica que la potencia de la señal recibida, se encuentra por encima de la potencia de ruido a la entrada del receptor.

Un sistema con unas muy buenas condiciones de canal (alto valor de SNR), utiliza los MCS de más alto orden, lo que permite aumentar la capacidad de transmisión del sistema. En caso contrario, para unas condiciones de canal pobres, se utilizan los MCS de bajo orden incrementando la redundancia y reduciendo la capacidad, con el fin de mantener la calidad de la conexión y la estabilidad del enlace [38].

Como se observa en la figura 2.7, para alcanzar una determinada velocidad de transmisión, el canal EVA 70Hz requiere un mayor valor de SNR comparado con el requerido para el canal EPA 5Hz, lo cual indica que el canal EPA 5Hz presenta mejores condiciones de propagación. Lo anterior se debe a que el canal EVA 70Hz presenta un mayor corrimiento de frecuencia debido al efecto Doppler por la velocidad de desplazamiento del UE, además de la multitrayectoria, por lo tanto el sistema bajo esas condiciones requiere una mayor SNR para mantener la



velocidad de transmisión de datos, la calidad de la conexión y la estabilidad del enlace.

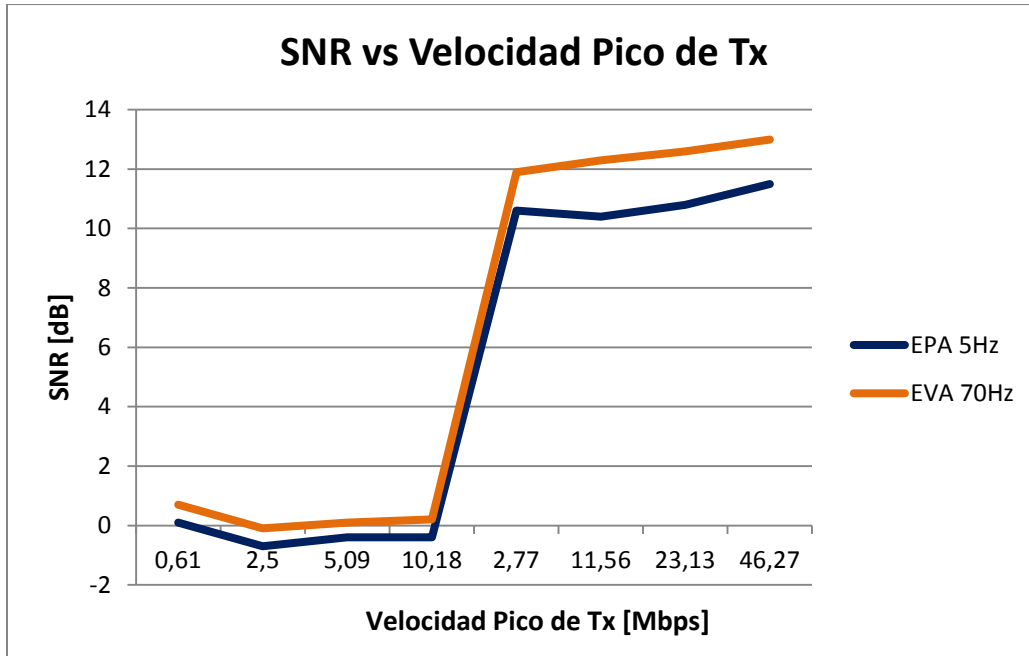


Figura 2.7 SNR vs Velocidad pico de transmisión

Para encontrar el valor de la distancia según la velocidad de transmisión de datos objetivo, se recurrió a las tablas 2.1 y 2.2 en donde se encuentran las diferentes velocidades pico asociadas a cada combinación de BW y MSC. Para este caso, se escogieron como objetivo, las velocidades pico de transmisión de datos asociadas tanto a la combinación de BW y MCS de menor orden como a la combinación de mayor orden. Lo anterior con el fin de observar la estrecha relación que existe entre capacidad y cobertura a partir de las velocidades que se esperan alcanzar al momento de la implementación de la red. El resultado de este experimento fue plasmado en la tabla 2.8, en donde se evidenció que si la velocidad objetivo es baja, es posible obtener valores muy altos de cobertura mientras que si se considera un valor alto de velocidad, se reduce considerablemente la cobertura para cada sitio que se desee implementar. Por ejemplo en el UL, para un BW de 10 MHz y un MCS de 16QAM 3/4, se obtuvo una velocidad de transmisión por celda igual a 23.13 Mbps y un rango de celda igual a 0.624 Km (Banda AWS), mientras que para un MCS QPSK 1/3, se obtuvo una velocidad de transmisión de

datos por celda igual a 5.09 Mbps y un rango de celda igual a 1.665 km. Lo anterior evidencia el compromiso que existe entre capacidad y cobertura antes de la implementación de una red móvil LTE.

Una vez encontrada la distancia (tabla 2.9), la que a partir de ahora se enunciará como el radio de la celda, se debe determinar su área de cobertura utilizando el modelo geométrico (hexagonal), de acuerdo al tipo de sitio que se desee implementar.

La figura 2.8 muestra el tipo de sitios con los que es posible trabajar dependiendo de los requerimientos de la red a implementar.

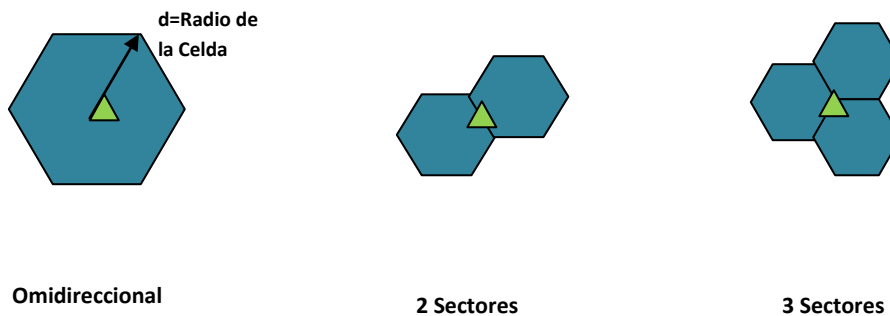


Figura 2.8 Tipos de sitios

El área de cobertura de un sitio se puede calcular por medio de las ecuaciones 2.11, 2.12 y 2.13, dependiendo de tipo de sitio que se desee implementar [39]:

Sitio omnidireccional:

$$\text{ÁreaSitio} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \times (\text{RadioCelda})^2 \quad (2.11)$$

Sitio de 2 sectores:

$$\text{ÁreaSitio} = \frac{6\sqrt{3}}{4} \times (\text{RadioCelda})^2 \quad (2.12)$$



Sitio de 3 sectores:

$$\text{ÁreaSitio} = \frac{9\sqrt{3}}{6} x (\text{RadioCelda})^2 \quad (2.13)$$

Con el fin de calcular en número de sitios requeridos para cubrir el área objetivo, se utilizó la ecuación 2.14:

$$\text{No.Sitios} = \frac{\text{ÁreaObjetivo}}{\text{ÁreaSitio}} \quad (2.14)$$

La tabla 2.10 muestra el número de sitios requeridos para los diferentes radios de la celda obtenidos en la tabla 2.9. Para este propósito se utilizó la configuración de 3 sectores por sitio, teniendo en cuenta únicamente el UL ya que este es el enlace que realiza los mayores requerimientos para el sistema debido a su limitación en potencia.

Tabla 2.10 Número de sitios requeridos según el rango de la celda

BW [MHz]	Modulación-Codificación	Condiciones de Propagación	Distancia [Km] (Cost-Hata)				Distancia [Km] (Okumura-Hata)	
			2570 MHz	No. Sitios	1755 MHz	No. Sitios	915 MHz	No. Sitios
1.4	QPSK 1/3	EPA 5Hz	-		3.02	1	5.52	1
		EVA 70Hz	-		2.98	1	5.45	1
	16QAM 3/4	EPA 5Hz	-		1.15	2	2.11	1
		EVA 70Hz	-		1.77	1	3.25	1
5	QPSK 1/3	EPA 5Hz	1.45	1	2.09	1	3.83	1
		EVA 70Hz	1.43	1	2.06	1	3.78	1
	16QAM 3/4	EPA 5Hz	0.54	7	0.78	3	1.42	1
		EVA 70Hz	0.80	3	1.16	2	2.12	1
10	QPSK 1/3	EPA 5Hz	1.15	2	1.66	1	3.04	1
		EVA 70Hz	1.14	2	1.65	1	3.02	1
	16QAM 3/4	EPA 5Hz	0.43	11	0.62	5	1.14	1
		EVA 70Hz	0.65	5	0.94	2	1.72	1
20	QPSK 1/3	EPA 5Hz	0.94	2	1.36	1	-	
		EVA 70Hz	0.94	2	1.35	1	-	
	16QAM 3/4	EPA 5Hz	0.34	18	0.49	10	-	
		EVA 70Hz	0.54	7	0.79	3	-	



En la figura 2.9 se aprecia que la relación que existe entre el radio de la celda y el número de sitios es inversamente proporcional, es decir, entre mayor sea el radio de la celda menor número de sitios van a ser requeridos para cubrir el área objetivo. Además, esta figura resalta la incidencia que tiene la frecuencia sobre el radio de la celda y por ende sobre el número de sitios, en otras palabras, el utilizar altas frecuencias conlleva a implementar un mayor número de sitios para satisfacer los requerimientos de cobertura acordados.

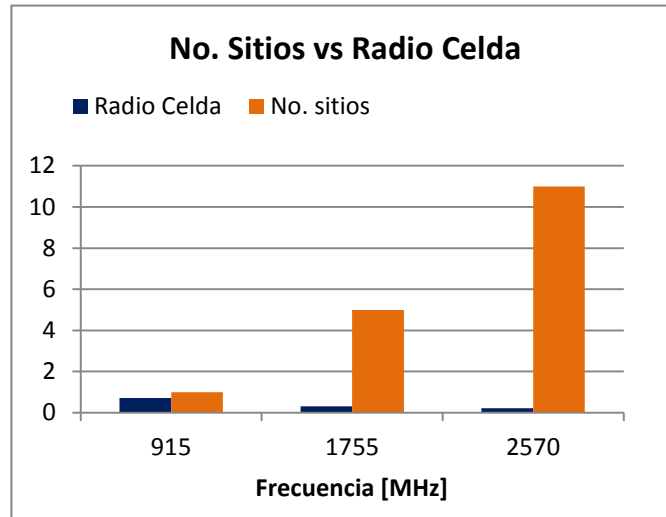


Figura 2.9 Número de sitios vs Radio de la celda

2.5 DISEÑO INICIAL DE ACUERDO A COBERTURA DE LA RED MÓVIL LTE PARA LA CIUDAD DE POPAYÁN

Una vez expuestas las diferentes combinaciones de BW y frecuencia de operación, se determinó que la velocidad objetivo para el diseño de la red móvil LTE para la ciudad de Popayán fuera de 23.13 en el UL y 63.66 en el DL, las cuales se lograron utilizando un MCS de 16QAM 3/4 y un BW igual a 10 MHz y 64QAM 3/4 con 10 MHz (utilizando MIMO 2x2) respectivamente. Estas combinaciones arrojaron un valor de radio de la celda de 0.624 km (UL) y 0.93 km (DL) de acuerdo a la frecuencia utilizada (AWS), lo cual determinó que 5 sitios eran necesarios para cubrir el área objetivo, como lo muestra la tabla 2.9. De acuerdo a lo anterior, se planteó el diseño inicial de la red móvil LTE para la ciudad de Popayán como lo muestra en la figura 2.10.

Debido a que la banda de 2600 MHz requiere un mayor número de sitios para cubrir el área objetivo y la de 900 MHz no permite BW de 20 MHz, se optó por

continuar con los pasos de la planeación utilizando la banda AWS. Adicionalmente esta banda es una de las mejores para brindar conexiones de alta velocidad y para la que hay mayor cantidad de UEs disponibles (tabletas, teléfonos inteligentes y módems), además es posible trabajar con todos los BWs y MCS permitidos por el estándar LTE [40] y es una de las bandas a subastar en los siguientes meses en Colombia.

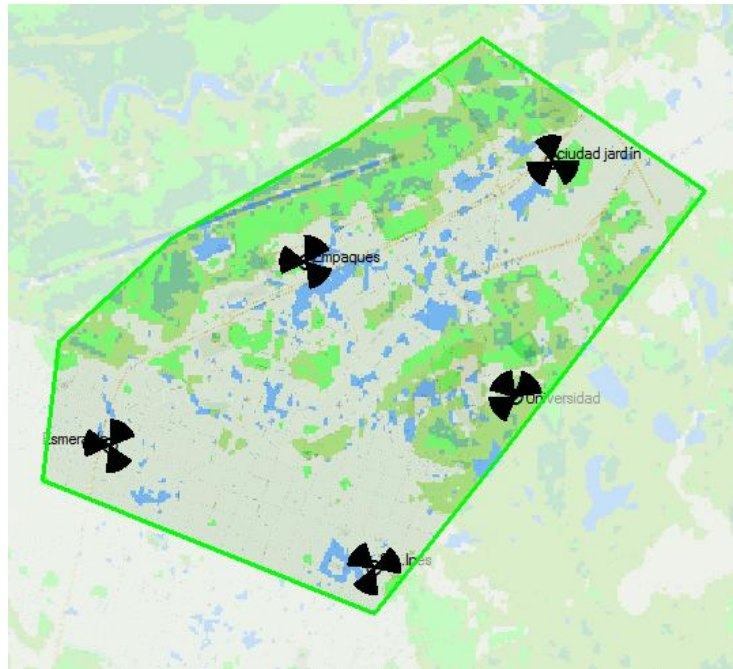


Figura 2.10 Diseño inicial de la red

2.6 PLANEACIÓN DE CAPACIDAD

Este proceso tiene como objetivo principal, encontrar el número de sitios necesarios para cumplir con los requerimientos de capacidad planteados anteriormente. Para este fin, se busca determinar el *throughput* de la celda, mediante la ecuación 2.15 [41], de acuerdo al BLER objetivo definido por el 3GPP, el cual para LTE corresponde a 10^{-2} , es decir, se admite máximo 1 bloque erróneo por cada 100 enviados [42].

$$C_{Mbps} = TBS(1 - BLER) \times 1000 \quad (2.15)$$



Donde:

C: capacidad de la celda.

TBS: tamaño del Bloque de Transporte (TBS, *Transport Block Size*)

BLER: tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*)

El TBS es un grupo de bloques de recursos con un MCS común en el cual se define cuantos bits es posible transmitir en un bloque de transporte durante un periodo de tiempo, este parámetro varía según los requerimientos de BW, distancia, niveles de potencia y MCS [43].

Según la especificación TS 36.104, el máximo *throughput* (C_{max}) que es posible alcanzar en el PUSCH y en el PDSCH (para una determinada combinación de MCS y BW) se define como *payload size* x 1000, donde para FDD, 1000 representa el número de subtramas por segundo¹⁷. Adicionalmente, basándose en el anexo A.2.1.2 de la especificación TS 36.101 del 3GPP (en donde se realiza el proceso de determinación del *payload size*¹⁸) y en la especificación TS 36.213 [44] se concluye que dicho tamaño de carga se convierte en un valor válido de TBS.

De acuerdo a lo anterior: $payload\ size \times 1000 = C_{max}$, $TBS = payload\ size$ y por lo tanto $TBS \times 1000 = C_{max}$. Así, reemplazando en la ecuación 2.15 se tiene que finalmente el *throughput* por celda se determina mediante la ecuación 2.16.

$$C_{Mbps} = C_{max}(1 - BLER) \quad (2.16)$$

Donde:

C_{max} : máximo *throughput* alcanzado bajo condiciones ideales ($BLER=0$). Los distintos valores de C_{max} según cada combinación de BW y MCS, corresponden a los valores pico de velocidad de transmisión plasmados en las tablas 2.1 y 2.2. En las tablas 2.11 y 2.12 se muestran los valores de *throughput* obtenidos que cumplen con el requerimiento de calidad para LTE establecido por el 3GPP ($BLER=0.01$).

¹⁷ Una subtrama dura 1ms.

¹⁸ Medida o dimensión de la carga útil.



Tabla 2.11 *Throughput* DL en Mbps alcanzado para BLER=0.01

MCS	η	MIMO	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
			RB=6	RB=15	RB=25	RB=50	RB=75	RB=100
QPSK 1/2	1	1x1	0.94	2.34	3.92	7.84	11.77	15.69
QPSK 1/3	0.66	1x1	0.61	1.54	2.58	5.17	7.76	10.35
16QAM1/2	2	1x1	1.88	4.70	7.84	15.69	23.54	31.39
16QAM3/4	3	1x1	2.82	7.05	11.77	23.54	35.32	47.09
16QAM1/1	4	1x1	3.76	9.41	15.69	31.39	47.09	62.79
64QAM3/4	4.5	1x1	4.23	10.59	17.66	35.32	52.98	70.64
64QAM5/6	5	1x1	4.70	11.77	19.62	39.24	58.86	78.49
64QAM1/1	6	1x1	5.64	14.12	23.54	47.09	70.64	94.18
64QAM3/4	9	2x2	7.55	18.89	31.51	63.02	94.53	126.05
64QAM5/6	10	2x2	8.39	21.00	35.01	70.03	105.04	140.06
64QAM1/1	12	2x2	10.07	25.20	42.01	84.03	126.05	168.07

2.12 *Throughput* UL en Mbps alcanzado para BLER=0.01

MCS	η	MIMO	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
			RB=6	RB=15	RB=25	RB=50	RB=75	RB=100
QPSK 1/2	1	1x1	0.91	2.28	3.81	7.63	11.44	15.26
QPSK 1/3	0.66	1x1	0.60	1.50	2.47	5.03	7.55	10.07
16QAM1/2	2	1x1	1.83	4.57	7.63	15.26	22.89	30.54
16QAM3/4	3	1x1	2.74	6.87	11.44	22.89	34.35	45.80
16QAM1/1	4	1x1	3.66	9.10	15.24	30.49	45.73	61.08
64QAM3/4	4.5	1x1	4.05	10.29	17.12	34.35	51.53	68.70
64QAM5/6	5	1x1	4.55	11.38	19.00	38.11	57.22	76.32
64QAM1/1	6	1x1	5.44	13.66	22.86	45.73	68.70	91.63

Se puede observar que iguales valores de *throughput* se pueden lograr para diferentes combinaciones de BW y MCS, por ejemplo: 22.89 Mbps se obtuvo tanto para la combinación 10MHz y 16QAM 3/4 como para 15 MHz y 16QAM 1/2, lo cual significa que entre menor sea el BW disponible, mejor debe ser el MCS para alcanzar una determinada velocidad de transmisión.

Para encontrar el número de suscriptores que puede soportar un sitio de acuerdo al *throughput* obtenido en las tablas 2.11 y 2.12, se utiliza la ecuación 2.17 [29]:



$$No.Subscriptores_{Sitio} = \frac{C_{Mbps} \times CL \times NS_{Sitio}}{THU_{Mbps} \times BH} \quad (2.18)$$

Donde:

CL: carga de la Celda (CL, *Cell Load*). Se asume el 50% del volumen total de tráfico.

NS_{Sitio}: número de sectores por sitio.

BH: Hora Pico (BH, *Busy Hour*). Porcentaje de tráfico que cursa la celda durante la hora de mayor demanda en el día.

THU: valor de *throughput* promedio que se desea alcanzar por usuario.

El número de suscriptores por sitio se determinó de acuerdo al valor de *throughput* 22.89 Mbps correspondiente a la combinación 10 MHz con 16QAM 3/4 (en el UL) ya que el diseño inicial de la red se realizó bajo estas condiciones, reemplazando la ecuación 2.18 se obtuvo.

$$No.Subscriptores_{Sitio} = \frac{22.89 \times 0.5 \times 3}{1 \times 0.1} \approx 343 \left[\frac{Subscriptores}{Sitio} \right]$$

Una vez obtenido el valor del número de suscriptores por sitio, mediante la ecuación 2.19 se determinó el número de sitios necesarios para que la red pueda soportar el número total de suscriptores, distribuidos a lo largo del área de cobertura definida anteriormente. Se asumió un total de 2400 usuarios ya que el área objetivo es la de mayor circulación de clientes potenciales que requieren acceder a la red.

$$No.Sitios = \frac{No.TotalUsuarios}{No.Subscriptores_{Sitio}} \quad (2.19)$$

$$No.Sitios = \frac{2400}{343} \approx 7$$

2.7 DISEÑO DE ACUERDO A CAPACIDAD DE LA RED MÓVIL LTE PARA LA CIUDAD DE POPAYÁN

Una vez expuestos los dos procesos para la determinación del número de sitios necesarios para Popayán, según los requerimientos tanto de cobertura como de capacidad, se estableció el número de sitios que arrojó el proceso de planeación de capacidad, para conformar el diseño final de la red LTE para Popayán. Lo anterior debido a que este permite cubrir los 2400 usuarios planteados anteriormente y al mismo tiempo garantizarles una determinada velocidad durante la BH, la cual se asumió en horas de la noche. Con el fin de realizar un cálculo más realista, se asumió 400 usuarios para el centro de la ciudad y los otros 2000 distribuidos sobre el resto del área de cobertura. Siguiendo el proceso anterior se determinaron 2 sitios para brindar el servicio solo en el centro y 5 para el área restante. En la figura 2.10 se muestra el diseño final de la red móvil LTE para la ciudad de Popayán (los colores de los transmisores de la red son irrelevantes a la misma).

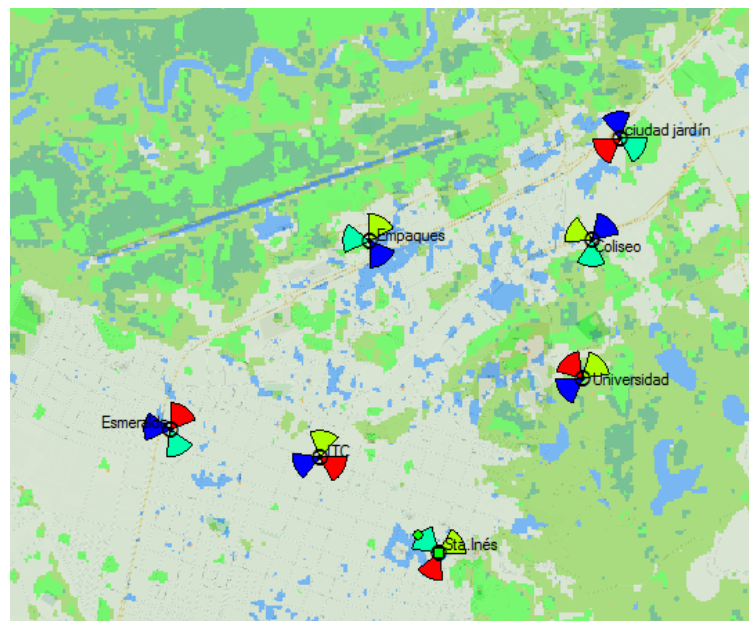


Figura 2.11 Diseño final red móvil LTE para Popayán



3. ANÁLISIS DE COBERTURA DE LA RED MÓVIL LTE DE POPAYÁN UTILIZANDO LA HERRAMIENTA ATOLL

En este capítulo se analiza el comportamiento del sistema en términos de cobertura, para este fin se plantearon 3 escenarios de análisis en los que se realizaron simulaciones compiladas en el software de planeación y optimización RF Atoll 2.8.0. El primer escenario de simulación se enfocó en corroborar los resultados teóricos obtenidos en el capítulo 2 a través de una predicción de cobertura disponible en la herramienta, haciendo uso de los valores de SNR requeridos para modelar los canales AWGN, EVA y EPA. El segundo escenario analizó el efecto de la interferencia producida por la adición de nuevas estaciones base a la red y se propusieron estrategias de mitigación de esta interferencia a través del estudio del ángulo de inclinación de las antenas y el reúso de radiocanales. Finalmente, el escenario 3 de simulación se basó en realizar un análisis sobre los efectos de la implementación del esquema de diversidad en transmisión para sistemas MIMO 2x2 y 4x4. Cabe aclarar que a partir del escenario 1, los demás análisis se realizaron para el canal EVA en el DL ya que el UL es materia de estudio en el capítulo 4.

3.1 CONSIDERACIONES

Uno de los objetivos de los operadores al momento de implementar una nueva tecnología es tratar de aprovechar al máximo la infraestructura ya existente. Debido a esto, los sitios del diseño inicial de la red móvil LTE para Popayán planteados en la figura 2.9 del capítulo 2, fueron adaptados a la ubicación de algunos de los sitios pertenecientes al operador TIGO (Colombia Móvil) por medio de coordenadas geográficas, tal como se muestra en la figura 2.10, con el fin de minimizar los altos costos de despliegue que la creación de nuevos sitios, genera sobre la red LTE. Estos sitios fueron denominados: Esmeralda, Santa Inés, 3 cruces, Ciudad Jardín y Empaques. Sin embargo, es posible que un número adicional de sitios sean necesarios para alcanzar los objetivos tanto de capacidad como de cobertura.

Cada uno de los 3 transmisores de cada sitio del diseño se configuró de acuerdo a los requerimientos planteados en el capítulo 2. Dicha configuración considera los siguientes parámetros:



Tabla 3.1 Configuración de los transmisores LTE

Ángulo de inclinación (<i>tilt</i>) mecánico	0
Azimuth	Depende de la posición del UE y del e-NodeB.
Antena	Kathrein 65deg 18dBi 2tilt 2100MHz.
Equipo LTE	Amplificador Montado en Torre (TMA, <i>Tower Mounted Amplifier</i>), equipo para estación base que define Atoll por defecto, longitud del cable de alimentación.
Tipo de transmisor	Intra-red (Servidor e interferente).
Banda de frecuencia	1700/2100 FDD – 10 MHz (E-UTRA Banda 4).
Modelo de propagación	Cost-Hata

Una vez ubicados los eNodeB de acuerdo a la distribución de la compañía TIGO, se procedió a realizar diferentes simulaciones utilizando la herramienta software Atoll 2.8.0 para analizar el efecto de esta configuración sobre la cobertura en el área objetivo. Se efectuaron simulaciones de cobertura teniendo en cuenta diversos parámetros como: nivel de señal, cobertura por transmisor, cobertura por mejor portadora LTE en el DL y zonas superpuestas.

3.1.1 Fenómenos Presentes en la Propagación de la Señal RF

- Pérdidas por espacio libre: estas pérdidas miden la dispersión de la potencia en un espacio libre sin la presencia de algún obstáculo, es decir, la señal de radiofrecuencia, se debilita en el espacio libre debido a la expansión que experimenta la onda al viajar en una superficie esférica.
- Primera Zona de Fresnel: el análisis de la influencia de obstáculos se realiza mediante los elipsoides de Fresnel, considerando que el enlace debe mantenerse libre de obstáculos (línea de vista) para transmitir la máxima potencia desde un punto transmisor a un punto receptor. Es innecesario que el trayecto pase muy por encima de los obstáculos po lo que basta con trabajar en el entorno de la primera zona de Fresnel. Si existen obstáculos, estos generarán pérdidas debidas a la difracción.



- **Multitrayectoria:** la onda radio puede llegar a su destino a través de múltiples caminos. Los retardos y la interferencia pueden ser consecuencia de este fenómeno, sin embargo, es posible aprovechar los efectos de la multitrayectoria para superar los límites de la línea de vista cuando se dispone de suficiente potencia.
- **Absorción:** la onda radio se atenúa o se debilita debido a la transferencia de energía que realiza al medio por el cual viaja. Existe una fuerte absorción en materiales conductores como el metal y el agua en todas sus formas (lluvia, neblina y la contenida en el cuerpo humano). Para otros materiales como la madera, árboles, rocas, entre otros, su comportamiento es determinado por su concentración de agua.

3.1.2 Relación Portadora a Interferencia y Ruido (CINR, *Carrier to Interference and Noise*) es una medida de calidad expresada en dB, necesaria para el correcto procesamiento de una señal en recepción [46]. La señal recibida debe tener un valor aceptable de CINR, el cual varía según la tecnología utilizada para la implementación de una red móvil [47]. Dependiendo del canal, un determinado valor de CINR se asocia a un determinado MCS para lo cual se cumple que entre mayor sea el orden del MCS, valores más altos de CINR serán asociados al mismo. De esta manera, al obtener un valor más alto de CINR la cobertura de la portadora tiende a disminuir, mientras que la capacidad aumenta, por lo tanto esta relación es uno de los factores que determina el *throughput* de la celda a una determinada distancia.

Cabe resaltar que la relación CINR puede ser denominada también SNR, SIR, CNR, dependiendo del autor, ya que todas ellas miden las condiciones de canal de propagación a partir de la relación entre la potencia de la señal y la potencia de ruido a la entrada del receptor. Atoll utiliza el término CINR para modelar los canales de propagación con los cuales se realiza las simulaciones, por lo que a partir de este punto se utilizará este término.

3.2 ESCENARIO 1 DE SIMULACIÓN: COMPARACIÓN DE RESULTADOS

3.2.1 Análisis de Cobertura por Mejor portadora LTE en el Enlace de Bajada
Este estudio de la cobertura calcula y muestra las mejores portadoras radio LTE



basado en la relación CINR, en la cual se muestra la porción del terreno donde es posible alcanzar un determinado MCS para cada uno de los transmisores de cada sitio.

Es importante resaltar el hecho de que la relación entre la distancia y el MCS es inversa, es decir, esquemas de modulación de bajo orden como QPSK se asignan a los UEs más alejados del transmisor o aquellos que perciben una baja SNR, dado a que son más robustos frente a ruido e interferencia; los esquemas de modulación de alto orden como 64QAM se asignan a los UEs que perciben una muy buena SNR (muy cerca el UE de la estación base), con los cuales se logra una mayor eficiencia espectral, y por lo tanto mayores velocidades de transmisión de datos. Para un esquema de modulación dado, la tasa de codificación se establece dependiendo de las condiciones del enlace radio: tasas de codificación más bajas pueden ser utilizadas bajo condiciones pobres de canal (elevada redundancia), mientras que las altas (baja redundancia) son utilizadas bajo condiciones más favorables, es decir, si se cuenta con altos niveles de SNR [48].

Para esta sección se planteó el escenario 1 de simulación, el cual consideró solo un eNodeB de 3 sectores, esto con el fin de simular el comportamiento del sistema sin los efectos de la interferencia que puede generar la implementación de otros eNodeBs y comparar los resultados con los obtenidos de manera teórica en el capítulo 2. La ubicación del eNodeB tuvo en cuenta la uniformidad tanto del *clutter* (urbano) como del terreno presente en la zona sur de la ciudad de Popayán, lo cual se debe a que estas condiciones se asemejan más a las consideraciones realizadas para los cálculos teóricos, en donde no se consideró la irregularidad del terreno ni los tipos de *clutter* presentes en Popayán.

El escenario 1, implementado en Atoll, permite observar los siguientes parámetros: sensibilidad, pérdidas, distancia y *throughput* para diferentes MCSs según el enlace (UL y DL) y para condiciones ideales de propagación (AWGN) y de multitrayectoria (EVA 70 y EPA 5). Es importante tener en cuenta que para modelar estos canales multitrayectoria, fue necesario modificar los valores de CINR configurados por defecto en Atoll.

Como ya se mencionó, Atoll basa sus cálculos de cobertura en los distintos valores de CINR disponibles en la herramienta. Cada uno de estos valores han sido establecidos por defecto en Atoll y en conjunto corresponden a un radio canal ideal (AWGN). Cabe resaltar que estos valores son ideales comparados con los radio canales que consideran el fenómeno de multitrayectoria.



La tabla 3.2 muestra los valores de CINR establecidos por defecto en Atoll, únicamente para las portadoras consideradas en el capítulo 2.

Tabla 3.2 Valores $C/(I+N)$ para AWGN en el DL

MCS	$C/(I+N)$ [dB]
QPSK 1/3	-2
16QAM 1/2	4
64QAM 3/4	13.2

Atoll permite observar el comportamiento en recepción cuando se ubica un UE a cierta distancia de un transmisor de referencia a través de la función “Análisis de un punto de recepción” descrita en el anexo A.4. Para este caso, se ubicaron 3 puntos de recepción en la distancia más lejana al transmisor para la cual se garantizó un determinado MCS (64QAM 3/4, 16QAM 1/2 y QPSK 1/3) para el DL tal como lo muestran las figuras 3.1 y 3.2. La figura 3.1 muestra el comportamiento de la propagación utilizando el canal AWGN mientras que la figura 3.2 permite analizar el comportamiento de la propagación haciendo uso de un canal EVA 70 (mayores valores de CINR requeridos).

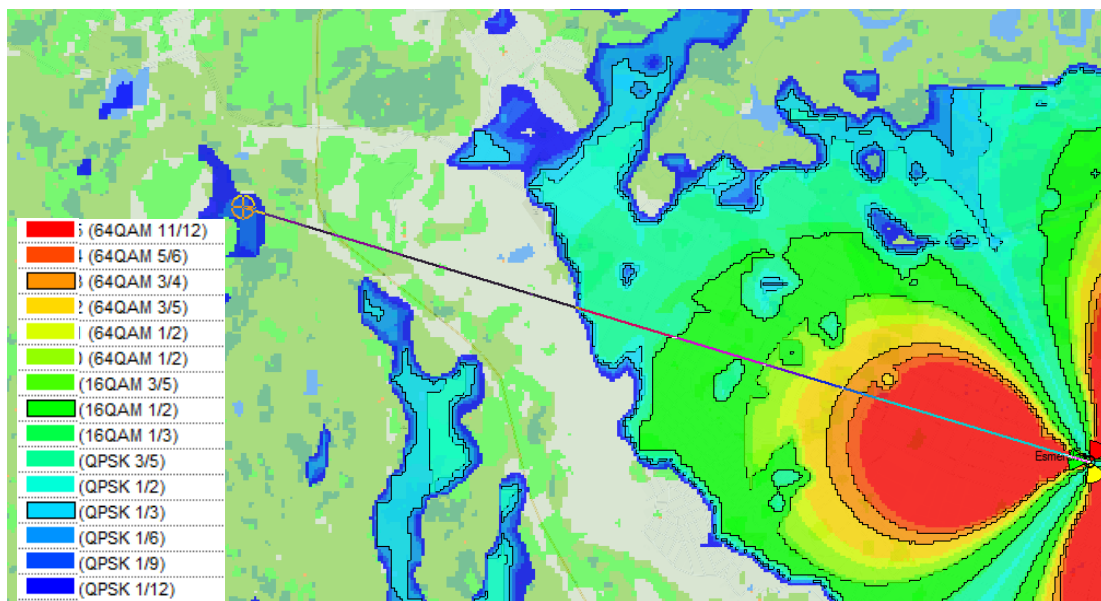


Figura 3.1 Cobertura DL para el canal AWGN

Con el fin de modelar el canal EVA y observar el comportamiento que tiene la señal bajo estas condiciones, fue necesario modificar los valores de CINR que la herramienta trae por defecto. La tabla 3.2 muestra únicamente los valores de CINR para las portadoras que se consideraron en los cálculos teóricos, los cuales son iguales a las SNR definidos en las especificaciones 36.101 y 36.104 [32,37] del 3GPP indicados en el capítulo 2. Cabe resaltar que las portadoras QPSK 1/3, 16QAM 1/2 y 64QAM 3/4 se encuentran representadas gráficamente por los colores azul, verde y naranja respectivamente.

Tabla 3.3 Valores $C/(I+N)$ para EVA en el DL

MCS	$C/(I+N)$ [dB]
QPSK 1/3	-1
16QAM 1/2	6.7
64QAM 3/4	17.7

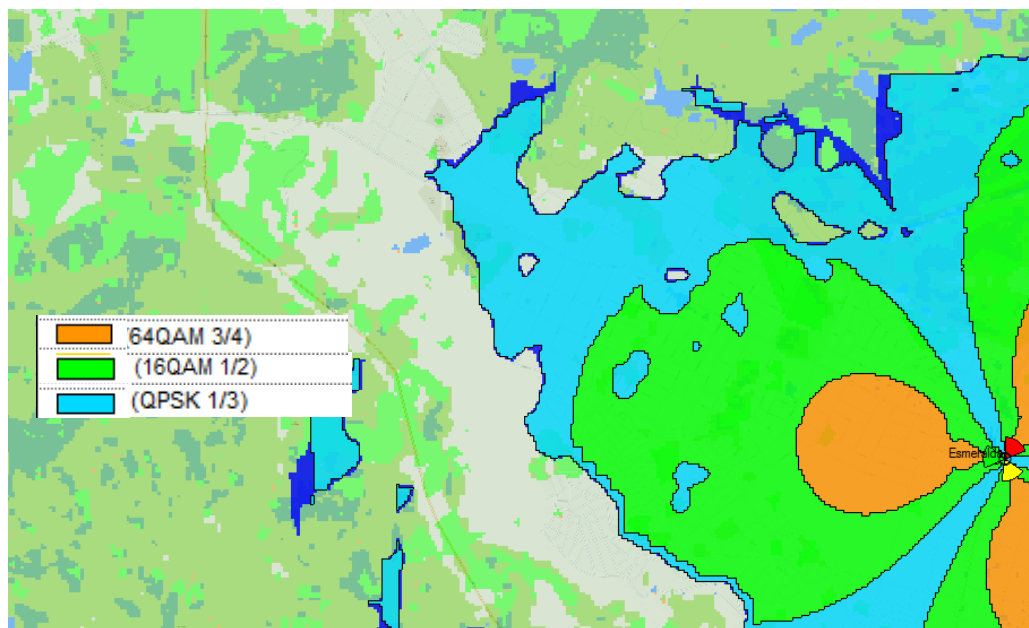


Figura 3.2 Cobertura DL para el canal EVA

La principal diferencia entre los canales AWGN y EVA radica en los valores de CINR para cada portadora, los cuales son mayores para EVA debido a que este canal presenta condiciones menos favorables para la propagación de la señal y por lo tanto en recepción, el requerimiento de CINR debe ser mayor para compensar la atenuación y degradación que experimenta la señal, es decir, la

potencia de la portadora debe ser mayor que la potencia de interferencia y ruido. Los altos valores de CINR utilizados para modelar el canal EVA tuvieron como consecuencia la reducción de la cobertura, lo cual indica que la relación CINR es inversamente proporcional a ella. La tabla 3.4 compara detalladamente el comportamiento de la red al utilizar los canales AWGN y EVA.

3.2.2 Análisis de Cobertura por *Throughput* en el Enlace de Bajada Para complementar la comparación de los cálculos teóricos realizados en el capítulo 2, se implementó una simulación de cobertura por *throughput* para el DL con el fin de determinar el punto hasta el cual es posible garantizar un mínimo de *throughput* por celda. Dicha simulación se realizó considerando únicamente 3 de las 15 portadoras posibles, en donde a partir de este punto cada una de ellas será enunciada de acuerdo a su MCS.

La figura 3.3 muestra los resultados de *throughput* correspondientes a cada MCS, en donde para 64QAM 3/4 representado por el color rojo se obtuvo un *throughput* igual o mayor a 20 Mbps, es decir, para la máxima distancia que alcanza la portadora con este MCS es posible garantizar un mínimo de 20 Mbps. De igual forma se obtuvo que era posible lograr por lo menos 12 Mbps para 16QAM 1/2, representado por el color amarillo y 3 Mbps para QPSK 1/3, representado por el azul.

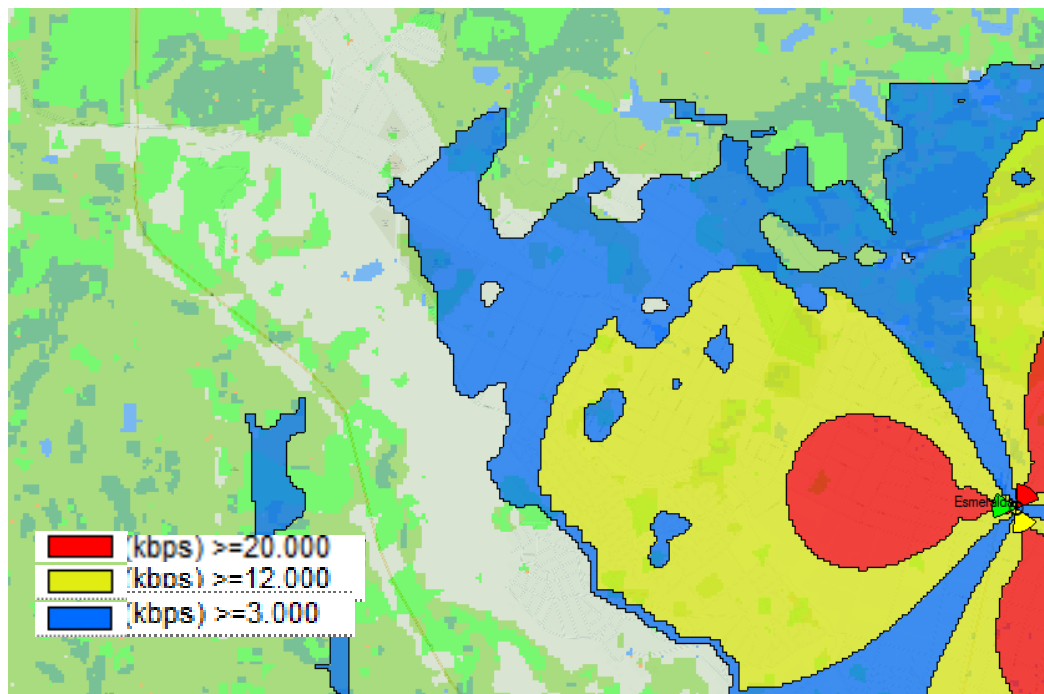


Figura 3.3 *Throughput* obtenido de acuerdo al MCS



La tabla 3.4 muestra los diferentes valores de sensibilidad, pérdidas y distancia medidos, los cuales fueron obtenidos en las simulaciones descritas anteriormente para las portadoras con los MCS que se consideraron en los cálculos teóricos realizados en el capítulo 2.

Tabla 3.4 Comparación de resultados DL

	MCS	Sensibilidad [dBm]	Pérdidas [dB]	Distancia [Km]	Throughput [Mbps]	Error relativo* (%)
Teórico EVA	64QAM 3/4	-77.73	136.73	0.87	35.32	-
	16QAM 1/2	-88.73	147.73	1.78	15.69	-
	QPSK 1/3	-96.43	155.43	2.95	5.17	-
Atoll AWGN	64QAM 3/4	-80.80	140.3	1.121	≥ 20	28.85
	16QAM 1/2	-88.99	148.67	1.858	≥ 12	4.38
	QPSK 1/3	-97.05	156.88	3.167	≥ 3	7.35
Atoll EVA	64QAM 3/4	-77.05	136.59	0.875	≥ 20	0.57
	16QAM 1/2	-87.43	147.47	1.733	≥ 12	-2.6
	QPSK 1/3	-94.18	158.7	2.655	≥ 3	-10

Nota: El proceso para la obtención de los resultados de la simulación se encuentra en el Anexo B.1
 * Error relativo (%)= ((Valor medido – Valor exacto)/ Valor exacto) x 100 [45]

Como se pudo observar en la tabla 3.4, las mejores condiciones de canal según la simulación y la configuración ingresada a la herramienta, fueron las del canal AWGN ya que al ser un canal ideal presenta una mayor cobertura que el canal EVA para cada uno de los MCS disponibles para el DL. Por otro lado, la diferencia entre los resultados de la simulación utilizando el canal EVA y los teóricos se debe a que la herramienta considera otros factores adicionales como los tipos de *clutter*, los cuales tienen asociado un determinado índice de absorción y debido a que Popayán es una zona húmeda presenta altos índices de absorción que se traducen en una mayor atenuación de la señal. Adicionalmente, Popayán es una ciudad que presenta una pronunciada irregularidad en su terreno, razón por la cual es muy común encontrar obstáculos que impiden la libre propagación de la señal. Es por esto que los resultados de distancia obtenidos en la simulación para el canal EVA son menores que los obtenidos teóricamente, exceptuando la distancia obtenida para 64QAM 3/4 que sobrepasa la teórica por 5m.

3.2.3 Análisis de Cobertura por Mejor Portadora en el Enlace de Subida Este estudio de la cobertura calcula y muestra las mejores portadoras radio LTE para el UL basado en la relación CINR, en la cual se muestra la porción del terreno donde



es posible alcanzar un determinado MCS para cada uno de los UE asociados a un determinado eNodeB.

A continuación, se muestran los valores de CINR obtenidos mediante la ecuación 3.3 que modelan los canales EVA y EPA en el UL:

Tabla 3.5 Valores C/(I+N) para EVA y EPA en el UL

MCS	C/(I+N) EVA [dB]	C/(I+N) EPA [dB]
QPSK 1/3	-4.1	-4.2
16QAM 3/4	4.5	10.8

La metodología de simulación empleada para este análisis es la misma que se siguió para el análisis del DL, con la diferencia de que se agregó el canal EPA basándose en los requerimientos mínimos tomados de la especificación técnica TS 36.104 del 3GPP [32]. Es importante tener en cuenta que en el UL se considera tanto el canal EVA como el EPA contrario al DL que solo considera el primero de estos canales de acuerdo a la especificación técnica TS 36.101 [37].

La tabla 3.5 muestra únicamente los valores de distancia obtenidos tanto para 16QAM 3/4 como para QPSK 1/3 ya que la herramienta no permite observar el comportamiento de la propagación cuando el eNodeB se encuentra en calidad de receptor y por lo tanto no fue posible obtener los valores de sensibilidad y las pérdidas para el UL. Los resultados de esta simulación se muestran de forma gráfica en el anexo B.

Tabla 3.6 Comparación de resultados UL

	MCS	Distancia [Km]	Error relativo* (%)
Teórico EPA	16QAM 3/4	0.624	-
	QPSK 1/3	1.299	-
Teórico EVA	16QAM 3/4	0.555	-
	QPSK 1/3	1.257	-
Atoll EPA	16QAM 3/4	0.605	-3.04
	QPSK 1/3	1.052	-19.01
Atoll EVA	16QAM 3/4	0.534	-3.78
	QPSK 1/3	1.004	-20.12



Tal como se mostró en la tabla 3.6 el canal EPA presenta una mayor cobertura que EVA ya que el segundo canal presenta unos valores de CINR mayores que el primero como lo mostró la tabla 3.5, lo cual indica que el canal EVA tiene mayores efectos negativos que EPA debido a que la dispersión de la señal es mayor y las velocidades de desplazamiento (corrimientos en frecuencia Doppler) que este canal considera (70 Hz) difieren a las consideradas para el canal EPA (5 Hz). Al ser más difíciles las condiciones del canal, se requiere un mayor valor de CINR en recepción, lo cual tiene como consecuencia la reducción de la cobertura. Cabe resaltar además que el alcance de la señal en el UL es considerablemente menor que en el DL, lo cual se debe principalmente a la limitación en potencia por parte del UE cuando este transmite.

3.3 ANÁLISIS DE COBERTURA POR NIVEL DE SEÑAL

Esta simulación presenta los diferentes niveles de señal que pueden ser medidos según la configuración de cada uno de los transmisores a una determinada distancia de recepción, estos valores representan la intensidad con la que llega la señal a un punto de recepción específico y varían entre -70dBm y -105dBm, representando el primero un nivel de señal más fuerte que el segundo.

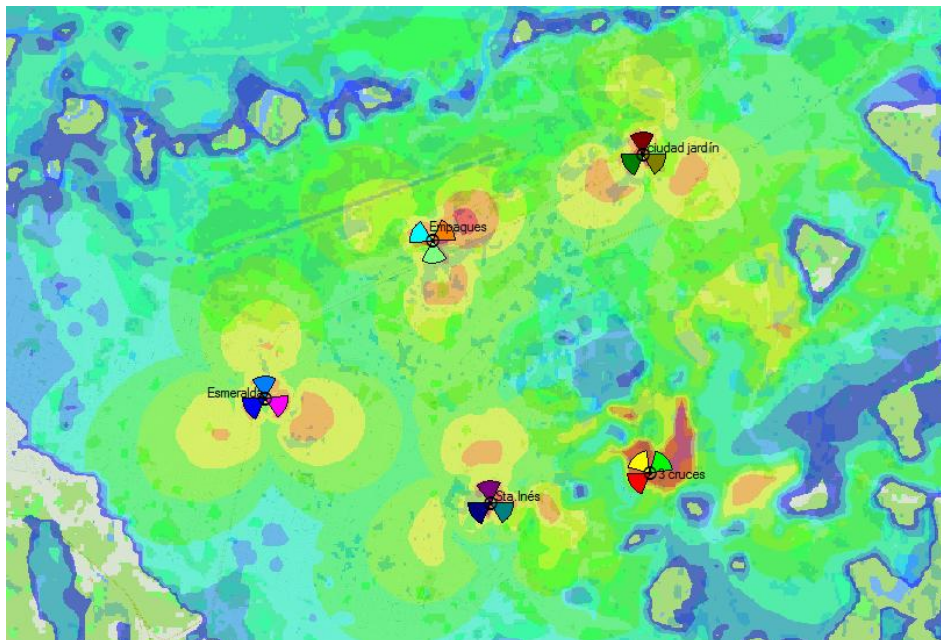


Figura 3.4 Predicción de cobertura por nivel de la señal



Tal como se muestra en la figura 3.4, los mejores niveles de señal (colores rojo y amarillo, -70dBm y -80dBm) se encuentran a distancias más cortas, por lo tanto y debido a las pérdidas de propagación que experimenta la señal, los niveles de señal más bajos (color azul, -105 dBm) se encuentran a una mayor distancia del transmisor. Además, es posible observar que la zona de cobertura objetivo en su mayoría se cubre por altos niveles de señal, es decir valores entre -70dBm y -90dBm (color verde). Sin embargo, la zona de las facultades de ingenierías y ciencias contables de la universidad del Cauca y alrededores presenta bajos niveles de señal que van desde -95dBm hasta -105dBm, por lo que se infirió que es necesario realizar modificaciones a la configuración del sector que apunta a esta zona con el fin de mejorar los niveles de señal presentes en esta porción del área objetivo.

3.4 ESCENARIO 2 DE SIMULACIÓN – EFECTO DE LA INCLUSIÓN DE NUEVOS SITIOS A LA RED

El escenario 2 de simulación se basó en la observación del efecto que produce adicionar nuevos eNodeBs a la red. Para este fin se utilizó la predicción de cobertura por mejor portadora en el DL con el objetivo de determinar el alcance de cada portadora (64QAM 3/4, 16QAM 1/2 y QPSK 1/3): en primera instancia para 1 solo sitio, posteriormente para 5 sitios, seguidamente al realizar variación de ángulos de inclinación de las antenas y por último al implementar planeación de frecuencias. Adicionalmente, el escenario utilizó la predicción de cobertura por zonas superpuestas en la cual se muestran aquellas para las cuales el UE recibe señal de uno, dos o más eNodeBs.

Para la construcción de este escenario se utilizó el número de sitios que resultó del análisis de cobertura realizado en el capítulo 2 y considerando la ubicación de los sitios del operador TIGO. Cabe resaltar que las configuraciones de los transmisores son las mismas que se plantearon en la sección 3.1.

En la figura 3.5 se muestra la cobertura por mejor portadora LTE en el DL únicamente para el sitio Esmeralda, el cual se convierte en el eNodeB de referencia para observar los cambios al momento de adicionar los 4 eNodeB restantes. Los colores azul, verde y naranja representan las portadoras QSPK 1/3, 16QAM 1/2 y 64QAM 3/4 respectivamente.

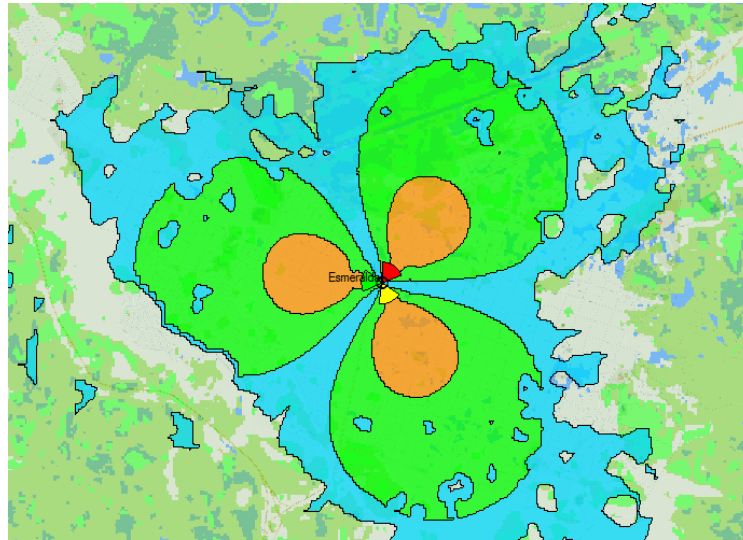


Figura 3.5 Cobertura por mejor portadora LTE en enlace de bajada (3 Sectores)

La figura 3.6 muestra la red móvil LTE de Popayán, la cual cuenta con 5 sitios inicialmente definidos de acuerdo a la zona de la ciudad donde se encuentran. Es posible observar la degradación de la señal, especialmente para las portadoras 64QAM 3/4 y 16QAM 1/2, esto debido a que son más vulnerables al ruido e interferencia que la portadora QSPK 1/3.

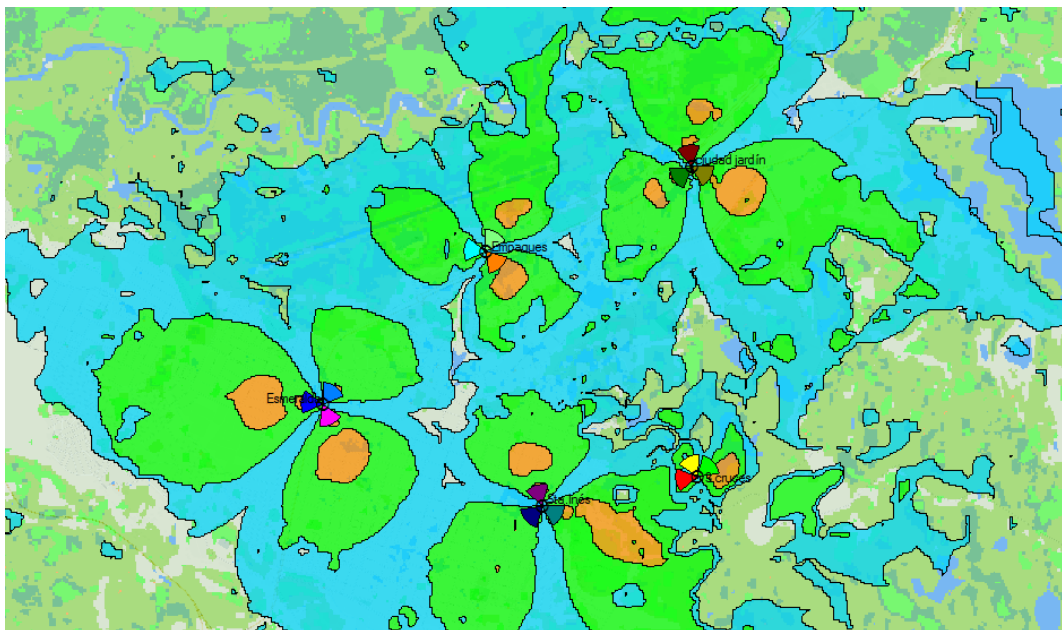


Figura 3.6 Interferencia causada por la inclusión de nuevos sitios

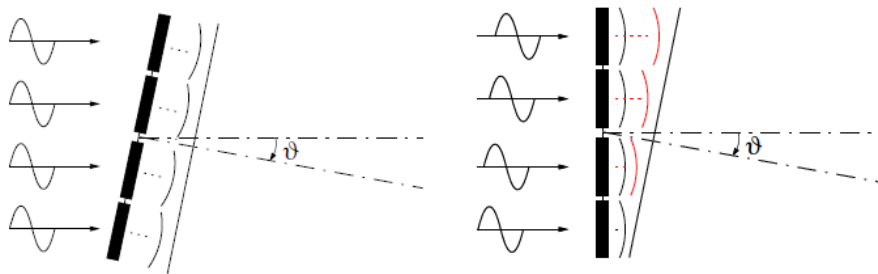


Con el fin de maximizar la eficiencia espectral, LTE fue diseñado para utilizar en sus sistemas un factor de reuso de frecuencias igual a 1, lo cual significa que cada eNodeB hace uso de todo el BW disponible para transmisión y no realiza planeación de frecuencias entre celdas. Debido a esto, la interferencia inter-celda puede llegar a ser severa para un UE situado en el borde de la celda o en lugares de cobertura limitada [49]. Ahora bien, como se pudo observar en la figura 3.5, la cobertura por mejor portadora LTE en el DL es bastante buena considerando el alcance que se logró para cada modulación, sin embargo, como lo muestra la figura 3.6, al adicionar los 4 eNodeBs restantes ocurrió un cambio muy relevante que resalta la existencia de interferencia implicando una reducción del alcance de cada portadora como lo muestra la figura 3.5.

Por otro lado, de acuerdo a la figura 3.6, es posible observar que el sitio denominado 3 cruces no genera un aporte significativo para cumplir con los objetivos de cobertura planteados inicialmente. El comportamiento de la señal utilizando únicamente este sitio se muestra en la sección B.3 del anexo B. Se consideró este sitio por que se encuentra en uno de los lugares más altos de la ciudad y tenía línea de vista con varios sectores de la misma, sin embargo, al implementar LTE haciendo uso de la banda de frecuencia AWS y un BW de 10 MHz, los resultados no fueron los esperados debido a la alta dispersión de potencia de la señal causada por la interferencia inter-celda. Lo anterior se traduce en un incremento de las pérdidas de propagación para este rango de frecuencias y esto implica que no es posible alcanzar los valores de *throughput* característicos de LTE. Por esta razón se planteó la necesidad de crear un nuevo sitio en los alrededores de la Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas de la Universidad del Cauca con el fin cubrir puntos de alta fluencia de usuarios con los valores de *throughput* que se esperan al utilizar la banda AWS y un BW de 10 MHz.

3.4.1 Inclinación de Antenas como Mecanismo de Reducción de Interferencia

También conocido como ángulo de inclinación de la antena, el *tilt* busca optimizar las redes en términos de cobertura y capacidad. Existen dos tipos de inclinación de la antena: *tilt* mecánico y *tilt* eléctrico, el primero varía la inclinación de la antena en su totalidad como se ilustra en la parte izquierda de la figura 3.7, mientras que en la parte derecha se muestra el segundo método de variación de la inclinación que se realiza ajustando la fase de los diferentes segmentos eléctricamente [50].

Figura 3.7 *Tilt* mecánico y eléctrico

A lo largo de este trabajo de grado se han realizado distintos cálculos teóricos de predicción de cobertura así como también diferentes simulaciones con el fin de calcular y mostrar de forma gráfica la distancia que cada portadora puede alcanzar bajo los requerimientos inicialmente establecidos. Ahora bien, esta parte del trabajo se enfocó en determinar los efectos que tiene el *tilt* en el diseño planteado para Popayán.

Tal como lo mostró la figura 3.6, la interferencia inter-celda es bastante pronunciada cuando nuevos sitios son agregados a la red, por esta razón se recurrió a la variación de las inclinaciones de las antenas con el fin de orientar la potencia de la señal hacia un área más específica reduciendo así el tamaño de la celda, dando como resultado una notable disminución de la interferencia presente en la red y un incremento de la capacidad ofrecida por la red LTE.

El escenario 2 buscó también analizar el efecto del *tilt* sobre la denominada interferencia inter-celda generada por los 5 sitios utilizando un factor de reuso de 1. Para este fin, se utilizó la predicción de mejor portadora LTE en DL para los valores de *tilt* 4° , 7° y 14° y de esta manera determinar la contribución que cada uno de estos ángulos de inclinación realiza a la reducción de la interferencia (comparación tabla 3.7), cabe resaltar que es posible variar el *tilt* mecánico en un rango desde -5° hasta 20° [51].

A continuación se muestra el efecto que tiene sobre la interferencia y el alcance de cada portadora LTE cuando se aplica una inclinación de 4° sobre las antenas de transmisión de la red.

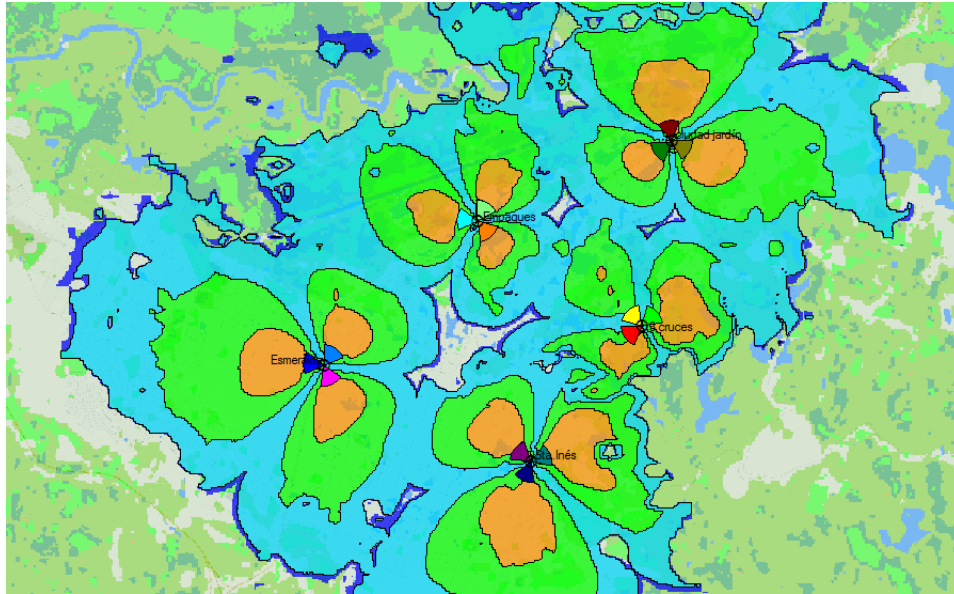
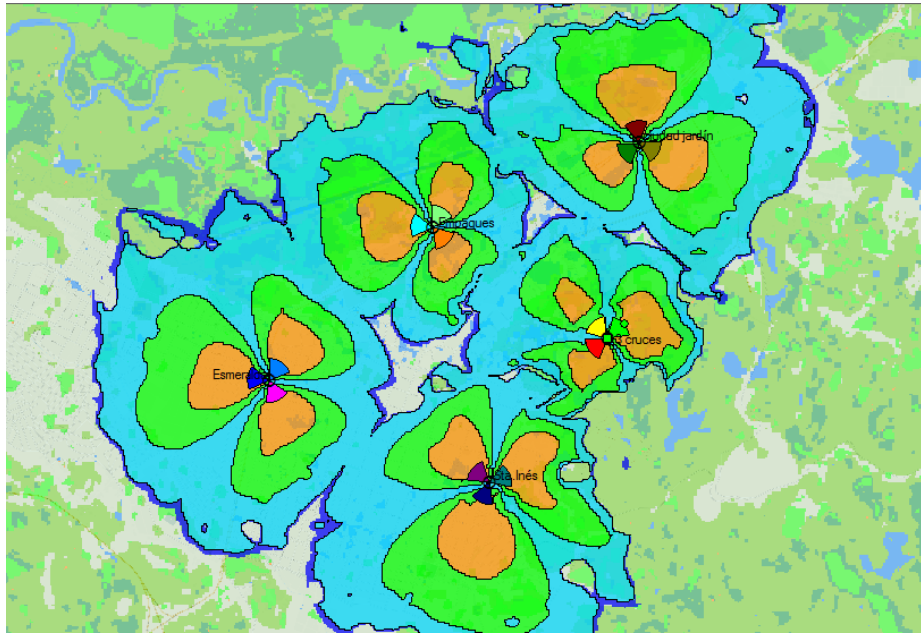


Figura 3.8 Efectos de un *tilt* de 4° sobre la red

Tal como se esperaba, el radio de la celda disminuyó (tabla 3.7) debido a que la energía de cada transmisor se enfoca en un punto más concreto y por consiguiente los niveles de interferencia decrecen haciendo evidente una mejoría en la portadora de 64QAM 3/4. Por otro lado, las portadoras de 16QAM 1/2 y QPSK 1/3 experimentaron una disminución de su alcance ya que al aumentar el *tilt* el lóbulo principal del patrón se reduce [52].

A continuación se muestra el efecto que tiene el *tilt* sobre la interferencia y el alcance de cada portadora LTE cuando se aplica una inclinación de 7° sobre las antenas de transmisión de la red.

Figura 3.9 Efectos de un *tilt* de 7° sobre la red

Como se observa en la figura 3.9, al aumentar en 3° la inclinación de las antenas de la red, comparado con la anterior simulación se presentó una mayor disminución de la interferencia inter-celda, lo que trajo como consecuencia una disminución del alcance de las portadoras (tabla 3.7). Gracias a estos resultados fue posible observar el compromiso que existe entre capacidad y cobertura de una red, es decir, el aumento del ángulo de inclinación de las antenas aumenta la capacidad de la red al mejorar el alcance¹⁹ de la portadora de 64QAM 3/4, lo cual quiere decir que la cobertura de la red en general alcanza menor distancia que cuando se asignó un *tilt* de 0° (tabla 3.7).

De lo anterior, es importante extraer que debe existir un equilibrio entre la capacidad y la cobertura de una red LTE, en otras palabras, debido a que el aumento en la cobertura significa una inevitable disminución de la capacidad y viceversa, es necesario establecer un balance entre estos dos parámetros que son cruciales para el desempeño apropiado de cualquier red. Cabe señalar que diferentes operadores e investigadores del sector han enfocado sus esfuerzos al desarrollo de nuevas tecnologías como LTE, las cuales tienen como objetivo

¹⁹ Distancia entre el transmisor y el punto más lejano para el cual se garantiza un determinado MCS.

aumentar considerablemente la capacidad de la red utilizando celdas más pequeñas y de esta forma ofrecer al usuario altas velocidades de transmisión de datos.

A continuación se muestra el efecto que tiene el *tilt* sobre la interferencia y el alcance de cada portadora LTE cuando se aplica una inclinación de 14° sobre las antenas de transmisión de la red.

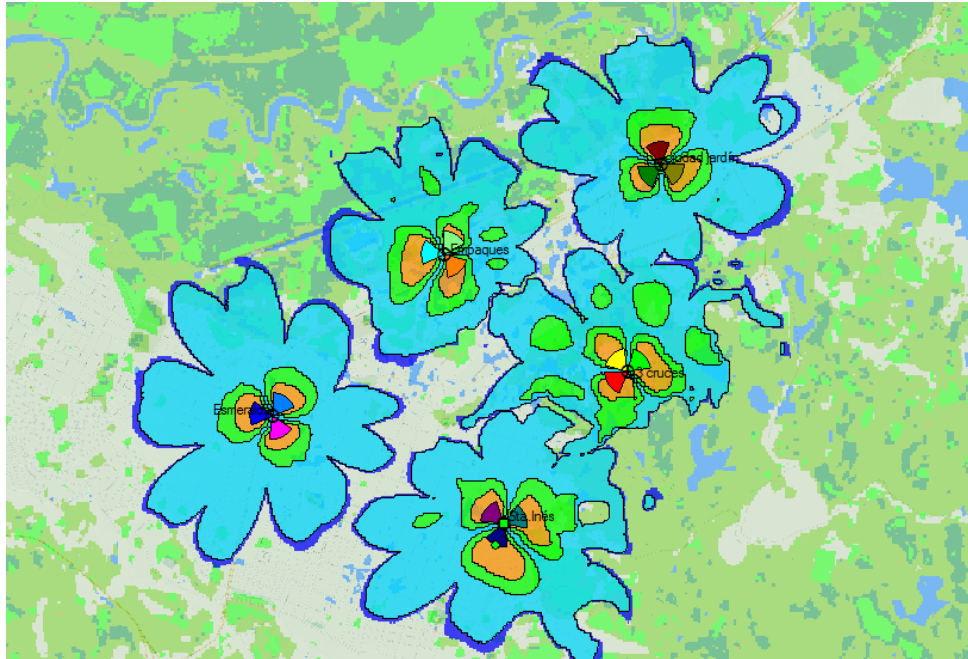


Figura 3.10 Efectos de un *tilt* de 14° sobre la red

La figura 3.10 evidencia que al usar este ángulo tan alto de inclinación, dio como resultado una importante mejora en términos de interferencia inter-celda debido a que la separación entre celdas es mucho más notable que con valores de *tilt* más pequeños.

Adicionalmente, la utilización de un *tilt* de 14° trae como consecuencia una considerable disminución en el alcance de las portadoras (tabla 3.7) y una importante disminución de la capacidad, ya que se reduce el alcance de la portadora que mayor *throughput* ofrece a los usuarios de esta red. En consecuencia utilizar *tilts* altos no resulta en un aumento de la cobertura ni de la capacidad la red y por lo tanto no se considera viable su implementación ya que implicaría adicionar mayor número de estaciones base para cumplir con los objetivos de cobertura y capacidad previamente establecidos.



De acuerdo al análisis de la variación de ángulos de inclinación como mecanismo de mitigación de interferencia, se determinó que al utilizar un *tilt* de 7° la red móvil LTE de la ciudad de Popayán presenta el mejor compromiso entre capacidad y cobertura en comparación con los resultados obtenidos para un *tilt* de 4° y de 14°.

La tabla 3.7 resume los diferentes valores de la distancia alcanzada por la portadora 64QAM 3/4 para los *tilt* evaluados en el escenario 2. Para la construcción de esta tabla se tomó en cuenta únicamente un sector por cada sitio para luego determinar el alcance de dicha portadora a medida que se aumenta el *tilt*.

Tabla 3.7 Alcance en metros de la portadora 64QAM 3/4 según el *tilt*

Sector	Alcance [m]			
	<i>Tilt</i> 0°	<i>Tilt</i> 4°	<i>Tilt</i> 7°	<i>Tilt</i> 14°
Esmeralda_3	446	520	480	215
Empaques_1	286	300	309	211
Ciudad Jardín_1	390	514	438	222
Universidad_3	500	400	330	190
Sta Inés_1	376	440	358	195

Como se puede observar el alcance de la portadora de 64QAM 3/4 al utilizar un *tilt* igual a 0° es menor que el alcance que se logra con una inclinación de 4°, esto debido a que la señal presenta bastante interferencia cuando no hay inclinación de las antenas ya que ninguna de las antenas transmisoras se encuentra apuntando a una zona específica de la ciudad, causando de esta manera que las señales de más de un transmisor lleguen a un mismo punto de la ciudad. Como era de esperarse, a medida que el *tilt* aumenta, la dispersión que experimenta la señal es menor, esto debido a que la energía de la señal es orientada cada vez más a una zona más limitada.

3.4.2 Reúso de Frecuencia como Mecanismo de Reducción de la Interferencia Además de la variación de los *tilts*, la planeación de frecuencias es otro mecanismo utilizado para mitigar la interferencia, en donde además del reúso 1, se dispone de diferentes esquemas para la implementación de la denominada Coordinación de Interferencia Inter-Celda (ICIC, *Inter-Cell Interference Coordination*) tales como: reúso duro de frecuencia, reúso suave de frecuencia y reúso fraccional de frecuencia.



- Reúso duro de frecuencia: Este esquema de ICIC es comúnmente utilizado en las redes GSM. Cuando se aplica a LTE significa que las sub-portadoras se dividen en 3, 4 o 7 grupos. Estos grupos son asignados a cada eNodeB de manera que los eNodeB vecinos no utilicen el mismo grupo de sub-portadoras. Lo anterior implica que la interferencia inter-celda se reduce significativamente y la eficiencia espectral se reduce en un factor igual al factor de reúso [53].
- Reúso Fraccional de Frecuencia (PRF, *Partial Frequency Reuse*): Este esquema consiste en dividir el espectro en dos partes, los cuales tendrán diferentes reúsos de frecuencia, la primera sección del espectro es utilizada en todas las celdas mientras que la otra es dividida entre los diferentes eNodeB. La idea es que el eNodeB asigne reúso 1 de frecuencia al centro de la celda y para el borde de la misma asigne un reúso, por ejemplo de 3. Este esquema es particularmente útil para tratar la ICIC en el UL, en donde la interferencia es severa cuando el UE se encuentra cerca de una fuente de interferencia ubicada en la vecindad de la celda.
- Reúso Suave de Frecuencia (SFR, *Soft Frequency Reuse*): En este esquema de ICIC, el área de la celda se divide en dos regiones tal como se hace en el esquema fraccional, con la diferencia de que a los usuarios del centro de la celda se les permite compartir sub-bandas con los usuarios ubicados en el borde de las celdas vecinas [54].

Debido a que la herramienta de simulación Atoll 2.8.0 es la primera versión que trae consigo el módulo LTE, la Planeación Automática de Frecuencias (AFP, *Automatic Frequency Planning*) solo es posible realizarla haciendo uso del esquema de reúso duro de frecuencia. Cabe resaltar que se utiliza este esquema ICIC únicamente por que es el único que la herramienta soporta mas no por que sea el mejor de los 4 esquemas de reúso posibles. La figura 3.11 presenta de forma gráfica los diferentes esquemas de reúso disponibles que se podrían implementar en LTE.

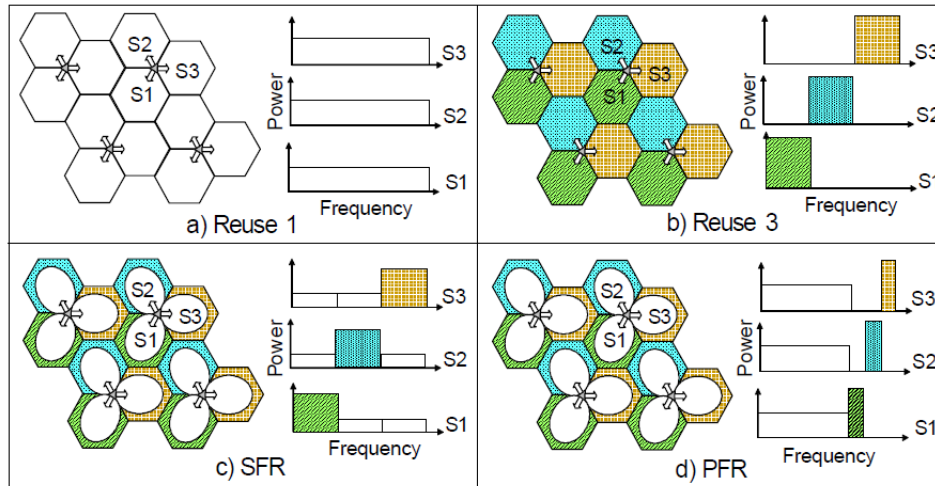


Figura 3.11 Esquemas de reuso

Fuente: <http://www.sce.carleton.ca/faculty/yanikomeroğlu/Pub/wcnc09-mr.pdf>

En general, un factor de reuso alto mejora el *throughput* de usuario en el borde de la celda al costo de degradar el promedio del *throughput* de la celda, la razón de dicha degradación es la reducción innecesaria de interferencia para los usuarios ubicados en el centro de la celda, lo cual hace que además se reduzca el espectro disponible entre celdas. Para mantener el *throughput* de usuario en el borde de la celda mientras se intenta mejorar el *throughput* promedio en el centro de la misma, fue desarrollado el concepto de reuso fraccional de frecuencia [55]. De este modo, si se desea mejorar la capacidad de una red LTE, el reuso fraccional de frecuencia es mejor alternativa que el reuso duro, ya que para este último, el BW en el centro de la celda no es compartido.

Con el ánimo de mejorar la eficiencia espectral del reuso fraccional, el estándar LTE ha adoptado el esquema de reuso suave de frecuencia, el cual es más eficiente en términos de ancho de banda, ya que emplea un factor de reuso menor pero presenta mayor vulnerabilidad a la interferencia que el esquema fraccional [56].

Con el fin de observar el comportamiento del sistema bajo el reuso duro, se recurrió una vez más a la predicción de mejor portadora LTE en el DL, con el objeto de determinar la contribución del Plan Automático de Frecuencias (AFP, *Automatic Frequency Plan*) a la disminución de la interferencia experimentada por la red móvil LTE de Popayán. La AFP de Atoll cuenta con 4 radiocanales disponibles para cada transmisor de la red, los cuales son escogidos teniendo en cuenta las matrices de interferencia calculadas por la herramienta, la mínima distancia de reuso y cualquier limitación impuesta por los eNodeB vecinos.



La figura 3.12 muestra la cobertura por portadora LTE en el DL, en la cual el AFP de Atoll escogió los 4 canales de 10 MHz (representados por los colores de los transmisores: rojo, amarillo, azul claro y azul oscuro) disponibles para DL de esta banda de frecuencia. Cabe resaltar que el número de canales disponibles depende del espectro disponible de la banda de frecuencia a utilizar, por ejemplo, la banda de 900 MHz en el DL tiene un BW de 35 MHz por lo que se necesitarían 3 radiocanales para garantizar un BW de 10 MHz por canal. En esta figura, el color amarillo representa la portadora 64QAM 3/4, el verde la de 16QAM 1/2 y el azul la de QPSK 1/3.

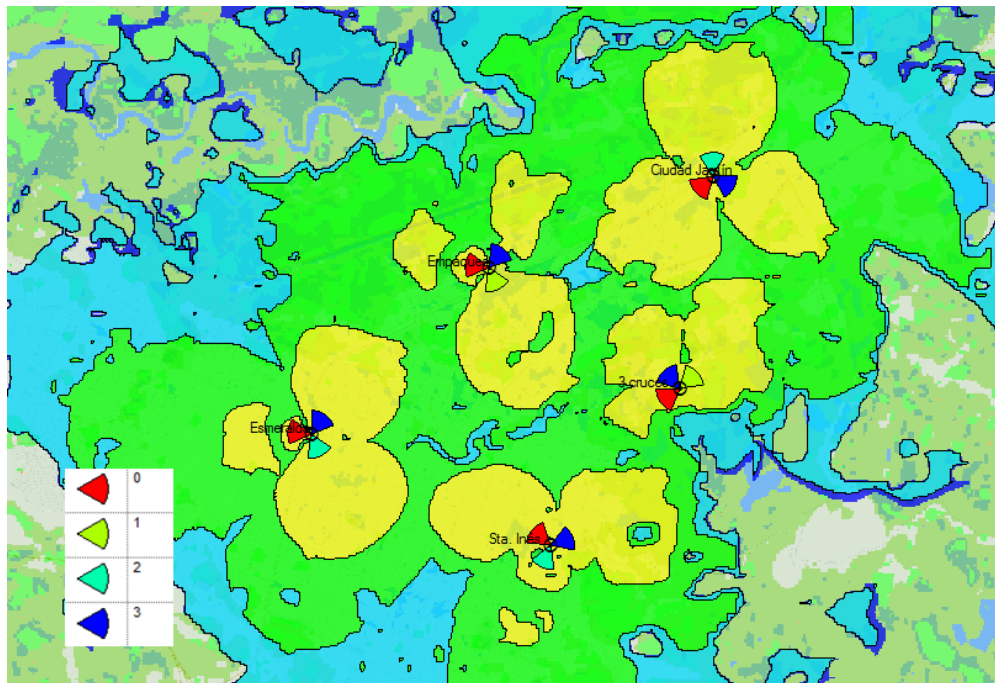


Figura 3.12 Efecto del reuso duro de frecuencia usando plan automático de frecuencia

Como se observa en la figura 3.12, el plan de frecuencias que Atoll construyó de forma automática mejoró la cobertura por portadora con respecto a la red que utilizaba el reuso 1, es decir, al emplear un factor reuso de 4 se mitigó considerablemente la interferencia experimentada inicialmente por la red. Sin embargo, el reuso de algunos radiocanales planteado por el AFP no fue el más eficiente ya que algunas celdas que utilizan el mismo radiocanal se interfieren entre sí causando una disminución de la cobertura sobretodo para la portadora de 64QAM 3/4, la cual es la más vulnerable a la interferencia. Por ejemplo, el

transmisor del sitio Esmeralda representado por el color azul claro genera una fuerte interferencia a uno de los transmisores del sitio Santa Inés debido a que los dos utilizan el mismo radiocanal. Para evitar situaciones como esta y mitigar la interferencia de una manera más eficaz, se optó por realizar planeación de frecuencias de manera manual. Dicha forma de planeación tuvo en cuenta el mismo número de radiocanales pero fueron distribuidos de tal forma que no se presentaran solapamientos entre celdas debido al uso del mismo radiocanal.

La figura 3.13 muestra el efecto del plan manual de frecuencias propuesto para la red móvil, en donde se puede apreciar una notable mejoría de la cobertura por portadora, mas específicamente la de 64QAM 3/4 (color amarillo) al igual que un incremento no tan pronunciado en la de 16QAM 1/2 (color verde). Por otro lado, la portadora QPSK 1/3 (color azul) no presenta una mejoría significativa para el sistema.

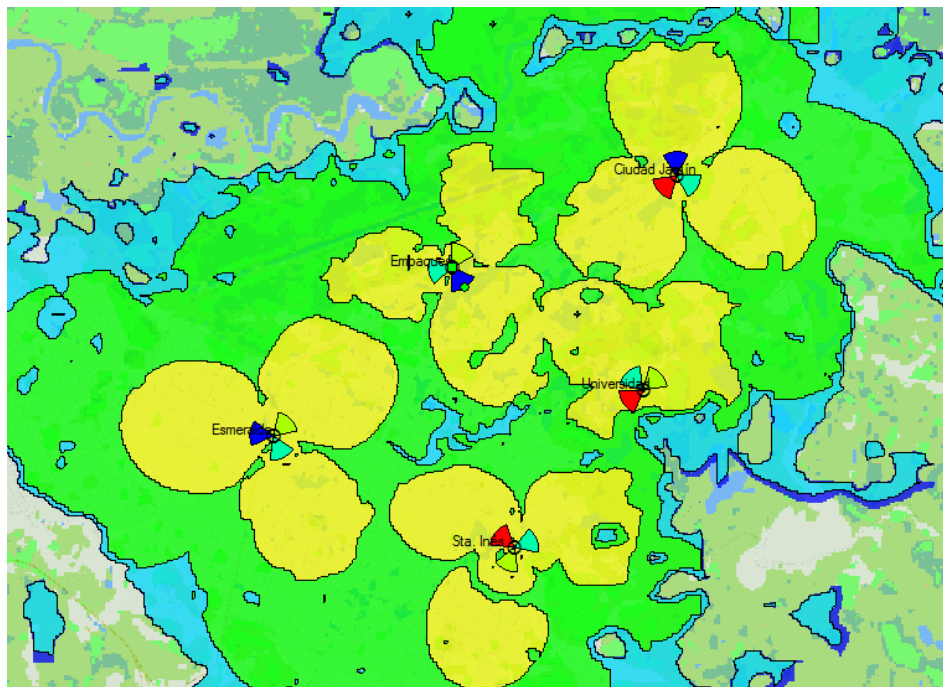


Figura 3.13 Efecto de la interferencia usando plan de frecuencias manual

La tabla 3.8 resume los valores de distancia que alcanza la portadora 64QAM 3/4 al utilizar un factor de reuso de 1, un plan de frecuencias calculado de forma automática por la herramienta y finalmente un plan de frecuencias planteado de forma manual.



Tabla 3.8 Alcance en metros de la portadora 64QAM 3/4 según el plan de frecuencia

Sector	Alcance [m]		
	Reúso = 1	AFP (reúso=4)	MFP (reúso =4)
Esmeralda_3	446	440	804
Empaques_1	286	764	754
Ciudad Jardín_1	390	703	703
Universidad_3	500	620	630
Santa Inés_1	376	644	680

Tal como se esperaba, al utilizar el mismo radiocanal para todo el sistema, la interferencia inter-celda aumenta, haciendo que el alcance de la portadora 64QAM 3/4 disminuya. Al implementar en el sistema un plan de frecuencias creado por la herramienta Atoll y con un factor de reúso de 4, la interferencia se mitigó notablemente generando un incremento en el alcance de la portadora pero con algunas falencias en ciertas celdas como la de Esmeralda_3. Se puede notar que al realizar el plan de frecuencias manualmente, estas falencias son superadas debido al cambio en la distribución de los radiocanales reusados para el sistema.

Para complementar el análisis de la interferencia causada por otras estaciones base, se trabajó con la predicción de cobertura por zonas superpuestas. La figura 3.14 muestra las áreas en donde existe la superposición de dos o más señales en el borde de la celda de la siguiente manera: el color azul oscuro indica el área cubierta por un solo transmisor, el azul claro por dos, amarillo 3 transmisores y finalmente el rojo con 4.

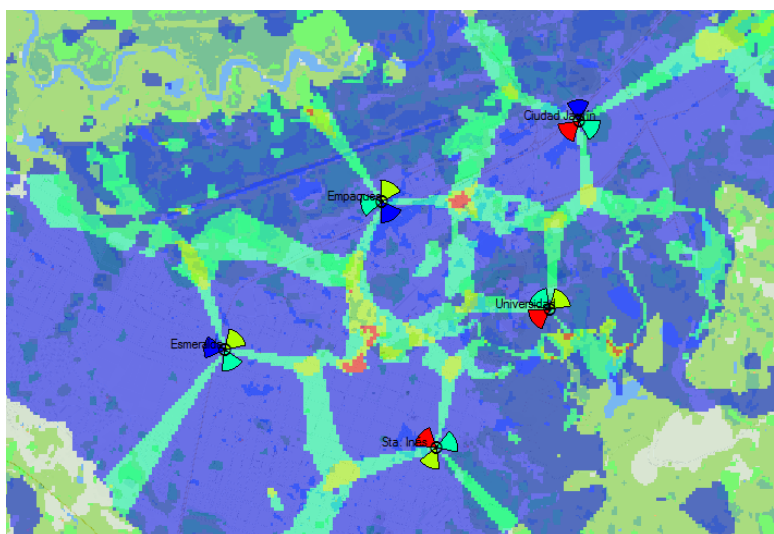


Figura 3.14 Predicción por zonas superpuestas



En la figura 3.14 se hace evidente la existencia de interferencia en el borde de la celda de los sectores de cada sitio. En este caso, la interferencia se mide a través del número de servidores a los que se podría conectar un UE cuando se encuentra ubicado en aquellas zonas de la ciudad donde una o más señales se encuentran para cubrir un mismo punto.

Aunque en el escenario 2 se trabajó de forma independiente tanto con variación de *tilt* como con planeación de frecuencias, ninguno de estos pudo mitigar por completo la interferencia inter-celda que se presenta en el borde de la celda.

3.5 ESCENARIO 3 – EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE DIVERSIDAD EN TRANSMISIÓN

El escenario 3 se enfocó en la implementación del esquema de diversidad en transmisión con el fin de observar su comportamiento y analizar si su desempeño se adapta a los requerimientos mínimos de cobertura inicialmente establecidos en el diseño de la red. Para esta simulación, se recurrió a la predicción de cobertura por portadora LTE en el DL con el fin de determinar el efecto que tiene la implementación de estos esquemas sobre la cobertura del sistema diseñado.

El concepto de diversidad en transmisión o en recepción se basa en el uso de más de una antena de transmisión o recepción para enviar o recibir más de una copia de la misma señal, estas copias son combinadas de forma constructiva en el receptor. De esta manera, después de dicha combinación, el nivel de la señal resultante es más resistente a la interferencia que la señal recibida desde una sola antena, por lo tanto la diversidad en transmisión mejora las condiciones de canal y la fiabilidad del enlace mitigando los desvanecimientos y disminuyendo la probabilidad de error [29].

La figura 3.15 muestra el resultado de la implementación de la técnica de diversidad en transmisión en la red diseñada para la ciudad de Popayán y para la cual, en este caso, las portadoras QPSK 1/3, 16QAM 1/2 y 64QAM 3/4 se encuentran representadas gráficamente por los colores azul, verde y rojo respectivamente.

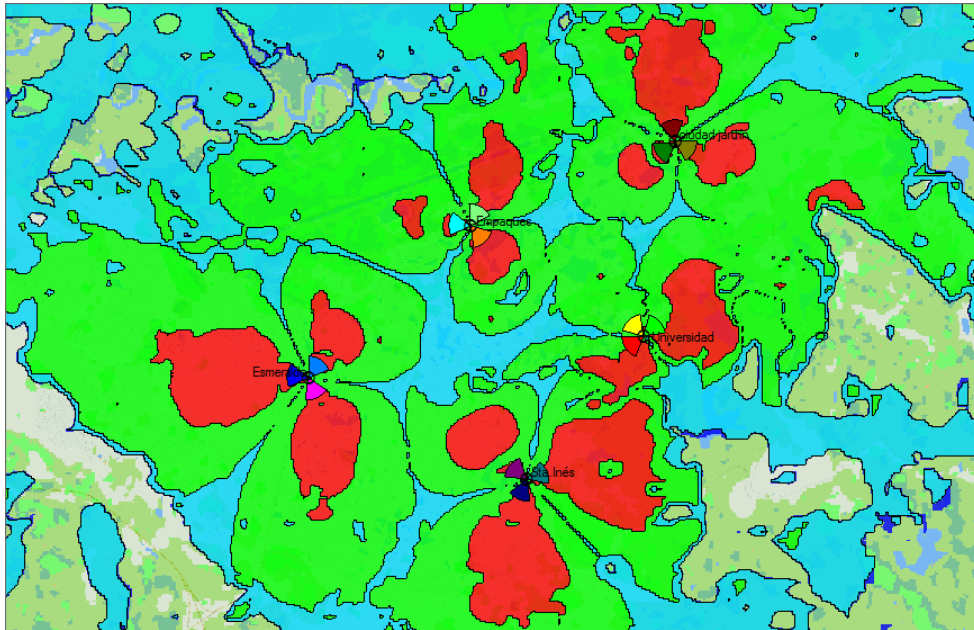


Figura 3.15 Reducción de interferencia al implementar diversidad en transmisión

La figura 3.15 muestra que al implementar la técnica de diversidad en transmisión, se reducen considerablemente los niveles de interferencia experimentados por la red en la etapa inicial ($Tilt=0^\circ$), razón por la cual existe un incremento en el radio de la celda y por ende en el alcance de las 3 portadoras. Lo anterior se produce debido a que las condiciones del canal con esta técnica mejoran haciendo que los requerimientos de CINR por portadora LTE para una determinada distancia sean menores que para un sistema que no implemente diversidad, lo cual exige menos del terminal receptor y mejora el desempeño del enlace.

La tabla 3.9 resume los valores del alcance de la portadora 64QAM 3/4 sin considerar un esquema diversidad en transmisión y al implementar sistemas 2x2 y 4x4. La predicción para el sistema 4x4 se encuentra en la sección B.5 del anexo B.



Tabla 3.9 Alcance en metros de la portadora 64QAM 3/4 utilizando diversidad

Sector	Alcance [m]		
	Sin diversidad	2x2	4x4
Esmeralda_3	446	910	1107
Empaques_1	286	333	410
Ciudad Jardín_1	390	721	756
Universidad_3	500	573	636
Santa Inés_1	376	493	604

Como se observa en la tabla 3.9, los valores de la distancia alcanzada por la portadora 64QAM 3/4 mejoraron notablemente ya que la implementación de los esquemas de diversidad mitigan la interferencia y aumentan la cobertura sin necesidad de recurrir a otros métodos como el reuso de frecuencias, las cuales sacrifican la cantidad de ancho de banda que utiliza una celda. Al implementar un sistema MIMO 4x4, el alcance de la cobertura por portadora aumenta aún más que al emplear el 2x2. Además, gracias a estos esquemas, la fiabilidad y la robustez ante interferencia se incrementa al igual que los costos para su implementación.



4. ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE LA RED MÓVIL LTE DE POPAYÁN UTILIZANDO ATOLL

En este capítulo se analiza el comportamiento de la red en términos de capacidad y se evalúan diferentes configuraciones de red, con el fin de establecer un diseño que permita satisfacer los requerimientos planteados en la fase inicial del proceso de planeación. En la primera parte, este capítulo aborda las consideraciones necesarias para entender el procedimiento que sigue la herramienta para asignar los recursos de la red. En la segunda parte se evalúan diferentes configuraciones de red en 4 escenarios de simulación, con el fin de observar su efecto sobre la capacidad de la red. Estos escenarios fueron distribuidos de la siguiente manera: en el escenario 1 se evalúa la asignación de recursos para el centro y borde de la celda, en el 2 se variaron los ángulos de inclinación de las antenas, en el 3 se implementó un plan de frecuencias utilizando reuso de canales y en el escenario 4 se implementó diversidad en transmisión y recepción al igual que SU-MIMO. Finalmente, se obtuvo el diseño final de la red a partir de análisis realizado en los escenarios mencionados.

4.1 CONSIDERACIONES

Con el fin de analizar la capacidad de la red móvil LTE diseñada para Popayán, se asumió que durante la BH el 10% del número total de suscriptores (2400), fueran atendidos de forma simultánea. Para esto, se estableció 13 como el máximo número de usuarios por sector, a los que se les brindó conexión alcanzando al menos las demandas mínimas de *throughput*, lo cual depende del servicio con el que se esté gestionando la conexión.

La cantidad de usuarios definida para llevar a cabo el análisis de capacidad de esta red, corresponde a un número de suscriptores proyectados a futuro. Esta consideración se aplica para todos los escenarios, excepto para el 1, en donde se evalúa el comportamiento de red con una densidad de usuarios menor.

Para recrear los usuarios durante la BH mencionada anteriormente, Atoll 2.8.0 permite crear mapas de tráfico según la información disponible, tal como se mencionó en la sección 1.4.5. En este caso, se trabajó con el mapa de tráfico por densidad de usuarios dividiendo la zona objetivo en 2 secciones: la primera para el centro de la ciudad con 30 usuarios/Km² y la segunda para el resto de la zona con 50 usuarios/Km², en este caso se asumió la BH en horas de la noche por lo que la densidad de usuarios en el centro es menor.



La tabla 4.1 resume las consideraciones para realizar el análisis de capacidad de la red LTE para la ciudad de Popayán.

Tabla 4.1 Consideraciones del análisis de capacidad

No. subscriptores en toda la red	No. esperado de usuarios en toda la red (BH)	Densidad de usuarios [usuarios/Km ²]	
2400	240	Zona Centro	Zona norte y sur
		30	50

4.1.2 Configuración de los Servicios Tal como se planteó al final del capítulo 2, el *throughput* máximo teórico por celda en el DL es de 35.32 Mbps para un MCS de 64QAM 3/4. En otras palabras, si la celda atiende a un único usuario este dispondría de todo el *throughput* disponible cuando se encuentre dentro del alcance de dicho MCS.

Así, el *throughput* por usuario en BH es igual al *throughput* de la celda dividido entre el número de usuarios que puedan ser atendidos simultáneamente por la misma. Con el fin de garantizar a los usuarios de navegación Web una conexión de hasta 2 Mbps en BH, el número máximo de usuarios que pueden ser atendidos por sector es 13. Cabe resaltar, que si los usuarios se encuentran por fuera del alcance de 64QAM 3/4 el *throughput* por usuario será menor debido a que el MCS sería de menor orden, es decir, entre mayor sea el MCS utilizado por las portadoras LTE, mayores son los *throughputs* alcanzados por los usuarios al hacer uso de servicios multimedia como videoconferencia, Voz sobre IP (VoIP, *Voice over IP*) y Navegación Web.

La tabla 4.2 muestra la demanda mínima y máxima de *throughput* de los servicios disponibles en Atoll 2.8.0, además de otros parámetros como la prioridad del servicio y la máxima portadora LTE definida para cada enlace. Estos datos son utilizados por Atoll para realizar las simulaciones, las cuales permiten evaluar parámetros de desempeño como el *throughput* de canal, *throughput* de usuario, *throughput* de la celda, entre otros.



Tabla 4.2 Configuración de servicios multimedia en Atoll

	Navegación Web	VoIP	Videoconferencia
Tipo	Datos	Voz	Voz/Datos
Prioridad	1	3	2
Mínima portadora LTE DL y UL	QPSK 1/3	QPSK 1/3	QPSK 1/3
Máxima portadora LTE DL	64QAM 3/4	64QAM 3/4	64QAM 3/4
Máxima portadora LTE UL	16QAM 1/2	16QAM 1/2	16QAM 1/2
Demanda mínima de <i>throughput</i> DL [Kbps]	362	12.2	512
Demanda máxima de <i>throughput</i> DL [Kbps]	2470	12.2	2470
Demanda mínima de <i>throughput</i> UL [Kbps]	352	12.2	352
Demanda máxima de <i>throughput</i> UL [Kbps]	1067	12.2	1601
Nota: La prioridad del servicio va de 1 a 3, siendo este último el de mayor prioridad.			

Las demandas mínimas y máximas de *throughput* del servicio navegación web fueron establecidas de acuerdo al *throughput* disponible por celda que se determinó de forma teórica en el capítulo 2, es decir, la demanda mínima se estableció de acuerdo a la portadora QPSK 1/3 y la máxima de acuerdo a la portadora 16QAM 1/2 o 64QAM 3/4, dependiendo del enlace. Cabe resaltar que estas demandas, son el resultado de dividir el *throughput* disponible por celda entre el máximo número de usuarios por sector que se atenderían simultáneamente durante la BH.

En el caso de VoIP es necesario utilizar un códec²⁰ para enviar y recibir información con un determinado formato, para después convertirlo en señal audible [57]. El códec de Multi-velocidad Adaptativa (AMR, *Adaptive Multi-rate*), es el códec estándar del 3GPP para los servicios de voz y mensajería multimedia, el cual codifica la señal de voz a distintas velocidades que van desde 4.75 a 12.2 Kbps [58]. Por lo anterior, se estableció 12.2 Kbps como la demanda de *throughput* del servicio VoIP.

Las demandas de *throughput* del servicio videoconferencia fueron asignadas tal como se hizo para el servicio navegación web, exceptuando la demanda mínima del DL y la máxima del UL, siendo estas 512 y 1601 Kbps respectivamente. Esto se debe a la incursión de LTE en el mercado, para la cual se espera una conexión de alta calidad, teniendo en cuenta que los equipos LTE estarían dotados con

²⁰ Un códec convierte una señal analógica a una digital para transmitirla sobre una red de datos.



cámaras de alta definición que resultan en un incremento del tráfico que cursa por la red [59].

4.1.3 Planificadores de Paquetes En LTE todos los procedimientos de Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*) operan en el eNodeB y su principal objetivo es maximizar la eficiencia en el uso de los recursos radio del sistema mientras garantiza los niveles de QoS necesarios asociados a cada uno de los servicios [60]. Dentro de los procedimientos RRM se pueden mencionar: control de congestión, planificador de paquetes, modulación adaptativa, control de potencia y traspaso, entre otros [61].

La planificación de paquetes en LTE consiste en asignar de forma dinámica los recursos radio disponibles a los usuarios de acuerdo a las condiciones de canal para cada uno ellos [3]. Entre las funciones del planificador se encuentran: decidir en qué momento cada terminal transmite su información, con qué regularidad y haciendo uso de qué recursos.

Atoll 2.8.0 soporta 3 estrategias de planificación de paquetes: Demanda Proporcional (PD, *Proportional Demand*), Asignación equitativa (PF, *Proportional Fair*) y Máxima Relación Portadora Interferencia C/I (MCI, *Maximun C/I*), las cuales se describen brevemente a continuación:

- Demanda Proporcional: esta estrategia asigna los recursos de manera proporcional a las demandas de los usuarios, así, usuarios con mayor “demanda máxima de *throughput*” se les proporcionará *throughputs* más altos que usuarios con menor “demanda máxima de *throughput*” [8].
- Asignación equitativa: esta estrategia asigna la misma cantidad de recursos a todos los usuarios. De esta manera, los recursos asignados a cada usuario son los recursos que este requiere para alcanzar su “máxima demanda de *throughput*” o la cantidad total de recursos dividida por el número total de usuarios en la celda [8].
- Máxima Relación Portadora Interferencia C/I: esta estrategia asigna los recursos requeridos por los usuarios para alcanzar su máxima demanda de *throughput* de acuerdo al valor de CINR de sus conexiones. En otras palabras, los usuarios cuyas conexiones presenten buenas condiciones de canal (altos valores de la relación CINR obtendrán todos los recursos que estos requieran [8].

Para el análisis de capacidad de la red diseñada para Popayán, se trabajó con el planificador PF ya que es el que asigna de manera equitativa los recursos disponibles mientras que el MCI se basa en los valores de la relación CINR, lo



cual implica que a los usuarios ubicados en el borde de la celda se les asignaría menos recursos por las pobres condiciones de canal o algunos serían descartados ya que los recursos serían primordiales para usuarios con buenas condiciones de canal. Por otro lado, el PD se enfoca en los usuarios que se conectan con servicios que exijan mayor “demanda máxima de *throughput*”, dejando así sin recursos suficientes para alcanzar el máximo *throughput* a los usuarios conectados con servicios de menor “demanda máxima de *throughput*”.

4.2 ALGORITMO PARA SIMULACIÓN DE TRÁFICO LTE

El proceso de simulación de tráfico LTE sigue los siguientes pasos [62]:

4.2.1. Generación y Distribución de UEs Atoll genera una distribución de UEs para cada simulación haciendo uso del algoritmo Monte Carlo (el criterio de convergencia de este algoritmo se encuentra descrito en el anexo A.7). Cabe resaltar que Atoll genera tanto el número de usuarios totales en la red, según la densidad de usuarios ingresada, como la distribución de ellos.

A cada UE generado durante las simulaciones se le asigna un servicio, el tipo de movilidad y el tipo de terminal de acuerdo a la información ingresada en el mapa de tráfico creado.

4.2.2. Determinación del Mejor Servidor Atoll determina el mejor servidor para cada móvil basándose en el nivel de señal de referencia en el DL. El transmisor del sector que se considera el mejor servidor, se determina de acuerdo al nivel de señal de referencia más alto percibido por el móvil.

4.2.3. Cálculos Correspondientes al Enlace de Bajada Este procedimiento incluye los cálculos de señal de referencia para el DL, la determinación de la CINR de los canales PDSCH/PDCCH con su respectiva portadora y el cálculo del *throughput* de usuario.

4.2.4. Cálculos Correspondientes al Enlace de Subida Este procedimiento incluye los cálculos de la CINR de los canales PUSCH/PUCCH, la determinación de la mejor portadora para dichos canales, el cálculo del número de RBs asignados, la asignación de recursos radio y el cálculo del *throughput* de usuario.

4.2.5. Gestión de Recursos Radio Atoll utiliza un procedimiento de planificación inteligente para realizar la gestión de recursos radio. Este procedimiento consta de diversos pasos que se describen a continuación. Cabe resaltar que las diferentes



expresiones matemáticas utilizadas en este algoritmo aplican tanto para el DL como el UL [62].

4.2.5.1 Determinación del *throughput* pico de canal Este parámetro corresponde a la cantidad de recursos disponibles en cada celda y se calcula según la ecuación (4.1) [62]:

$$CTP = \frac{R_s \times \eta}{Dt} \quad (4.1)$$

Donde R_s representa la cantidad de recursos de la celda [Símbolos], η [bits/símbolo] eficiencia espectral de la portadora radio asignada al usuario según su ubicación y Dt la duración de la trama LTE (para las simulaciones es igual a 1s ya que Atoll realiza la asignación de recursos en 100 tramas, cada una de 10 ms [62]).

4.2.5.2 Selección de usuarios para la asignación de recursos En este proceso, como se indica en la ecuación 4.2, el planificador selecciona N usuarios N_{sel} por celda que resultan del valor mínimo entre el total de los generados $U_{generados}$ en el paso 4.2.1 y el máximo número de usuarios por celda²¹ U_{max} , definido en este caso como 13.

$$N_{sel} = \text{Min}(U_{Max}, U_{generados}) \quad (4.2)$$

En caso de no ingresar un número máximo de usuarios por celda, el algoritmo selecciona a todos los usuarios generados en la simulación. Por otro lado, los usuarios que no sean escogidos en esta etapa por el planificador, no se les brindará conexión y Atoll especificará la razón de su rechazo como “saturación del planificador”.

4.2.5.3 Asignación de recursos para satisfacer las demandas mínimas de *throughput* La demanda mínima de *throughput*²² es la velocidad mínima de transmisión de datos garantizada para un usuario que utilice un determinado servicio. Si existen suficientes recursos disponibles, el planificador distribuye la cantidad exacta de recursos requeridos para satisfacer las demandas mínimas de *throughput*, en caso contrario no le serán asignados recursos al usuario y por lo

²¹ Es el máximo número de usuarios establecidos por sector con el cual el planificador trabajará simultáneamente.

²² La demanda mínima de *throughput* depende del servicio, por lo que existen 3 demandas mínimas al igual que 3 demandas máximas (unas mayores que otras).



tanto no se le brindará conexión y Atoll especificará la razón de su rechazo como “saturación de recursos”.

Cabe resaltar, que el planificador ordena los usuarios de forma descendente de acuerdo a la prioridad asignada a cada servicio y de esta manera asigna los recursos requeridos para satisfacer la demanda mínima de *throughput* de usuario, empezando por el primer usuario (con la más alta prioridad del servicio) hasta el último.

Por medio de la ecuación (4.3), el planificador determina y asigna, los recursos necesarios para satisfacer las demandas mínimas de *throughput* a los usuarios seleccionados previamente (N_{sel}).

$$RU_{Min} = \frac{DTU_{Min}}{CTP} \times 100 \quad (4.3)$$

Donde DTU_{Min} representa la demanda mínima de *throughput* por usuario [Mbps] según lo establecido en el servicio, que en este caso fueron definidas como se mostró en la tabla 4.1. En este orden de ideas, RU_{Min} es el porcentaje del *throughput* de celda (CTP) que el usuario necesita para alcanzar la demanda mínima de *throughput* por usuario (DTU).

En el caso en que todos los recursos disponibles de la celda hayan sido asignados solamente para satisfacer las demandas mínimas de *throughput* de los usuarios, el planificador finaliza la asignación de recursos cuando se cumple la ecuación 4.4. Es decir, cuando la suma de todos los recursos asignados (RU_{Min}) obtenidos para los usuarios por celda N_{Sel} sea igual a la carga máxima definida para cada celda (en este caso 50%), tal como lo muestra la ecuación (4.4).

$$\sum_1^{N_{sel}} RU_{Min} = TL \quad (4.4)$$

4.2.5.4 Asignación de recursos para satisfacer las demandas máximas de *throughput* Si después de la asignación realizada en el paso anterior aún quedan recursos disponibles (se cumple la ecuación 4.5 y no la 4.4), estos se asignan de acuerdo al algoritmo de planificación, y de esta manera satisfacer las demandas máximas de *throughput* establecidas para cada servicio.

$$\sum_1^{N_{sel}} RU_{Min} < TL \quad (4.5)$$



Los recursos restantes corresponden a la diferencia entre la carga máxima de la celda y el total de recursos asignados para satisfacer las demandas mínimas, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$RC_{res} = TL - \sum_1^{N_{sel}} RU_{Min} \quad (4.6)$$

Para cada usuario se calcula la demanda de *throughput* restante como el menor valor entre: la diferencia de demanda máxima con la demanda mínima de *throughput* y la diferencia de demanda máxima con la capacidad máxima de cada UE, como se muestra en la ecuación (4.7).

$$DTU_{res} = Min(DTU_{Max} - DTU_{Min}, C_{UE}) \quad (4.7)$$

Todos los planificadores siguen el mismo proceso de asignación de recursos realizado hasta este punto. Sin embargo, para satisfacer las demandas máximas de *throughput* de los usuarios según el servicio, el proceso de asignación de recursos cambia de acuerdo al planificador elegido. A continuación se describe el proceso que sigue el planificador PF ya que fue el elegido para realizar el análisis de capacidad de la red LTE diseñada para Popayán.

4.2.5.5 Asignación de recursos para satisfacer las demandas máximas de *throughput* utilizando *Proportional Fair* Para continuar con el proceso, este planificador divide la cantidad de recursos restantes de cada celda entre el número de usuarios para la misma, como se indica en la ecuación 4.8.

$$RU_{Final} = \frac{RC_{res}}{N_{Sel}} \quad (4.8)$$

Posteriormente se calcula el número de recursos que cada usuario necesita para obtener su demanda de *throughput* restante, como se muestra en la ecuación 4.9.

$$RU_{nec} = \frac{DTU_{res}}{CTP} \quad (4.9)$$

Finalmente, los recursos asignados a cada usuario se definen de acuerdo a la ecuación 4.10.

$$RU_{Max} = Min(RU_{final}, RU_{nec}) \quad (4.10)$$

Cada vez que un usuario alcance su demanda máxima de *throughput* es eliminado de la lista de usuarios de la celda y por lo tanto se debe recalcular el parámetro RC_{res} como lo indica la ecuación 4.11.



$$RC_{res} = TL - \sum_1^{Nsel} RU_{Min} - \sum_1^{Nsel} RU_{Max} \quad (4.11)$$

El planificador finaliza la asignación de recursos, una vez la expresión 4.11 sea igual a 0, es decir, cuando todos los recursos restantes se hayan sido asignados cuando todos los usuarios de la celda hayan alcanzado su demanda máxima de *throughput*.

Al finalizar las simulaciones, un usuario puede clasificarse como conectado en el enlace definido (UL o DL) si:

- Ha sido asignado al sector que se considera el mejor servidor (sección 4.2.2).
- Cuenta con una portadora para el enlace definido, ya sea UL, DL o UL+DL (sección 4.2.3 y 4.2.4).
- Se encuentra entre los usuarios seleccionados por el planificador para realizar asignación de recursos radio (sección 4.2.5.2).
- Se le ha sido asignado al menos la “demanda mínima de *throughput*”, es decir, no ha sido rechazado debido a “saturación de recursos” (sección 4.2.5.3).

Si un usuario es rechazado durante los pasos definidos en las secciones 4.2.2, 4.2.3 o 4.2.4, el motivo de su rechazo es “sin servicio”. Si un usuario es rechazado durante el paso 4.2.5.2, el motivo de rechazo es “saturación del planificador” (el usuario no está dentro de los usuarios seleccionados para la asignación de recursos) y si un usuario es rechazado durante el paso 4.2.5.3, el motivo de su rechazo es “saturación de recursos” (todos los recursos de la celda fueron asignados a otros usuarios).

4.3 ESCENARIO 1- *THROUGHPUT* DE USUARIO EN EL CENTRO Y BORDE DE LA CELDA

El escenario 1 de simulación se basó en la observación del comportamiento de la red al distribuir pocos usuarios tanto en el borde como en el centro de la celda. Lo anterior con el fin de evaluar y analizar la importancia de la relación CINR sobre la asignación de los recursos y por ende sobre el *throughput* asignado por usuario.

Como lo muestra la figura 4.1, la construcción del escenario se realizó a través de dos mapas de tráfico (uno para el centro y otro para el borde de la celda) con una baja densidad de usuarios para constatar que la asignación de recursos es mayor



para el centro de la celda que para el borde. Los colores de los UE son irrelevantes a la simulación.

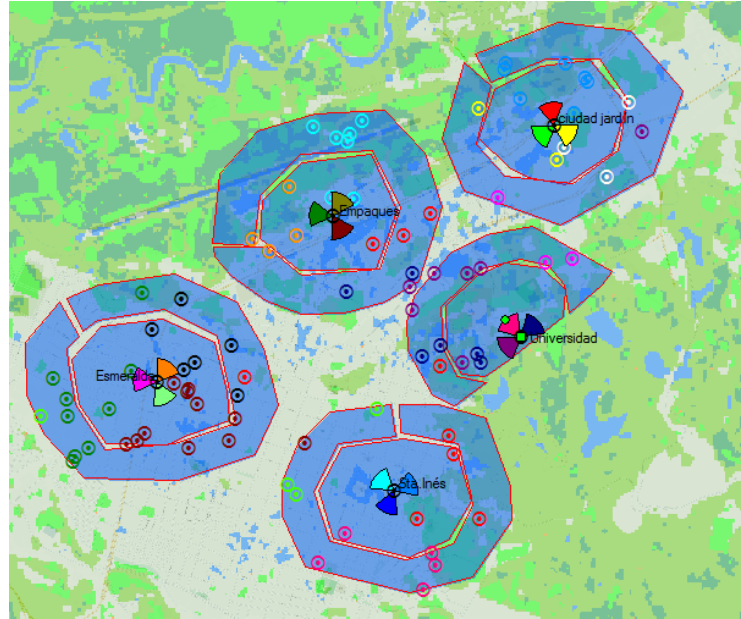


Figura 4.1 Distribución de usuarios para el centro y borde de la celda

La tabla 4.3 muestra los *throughputs* tanto de canal como de usuario para dos usuarios asociados a una misma celda, uno de ellos ubicado en el centro y el otro en borde de la misma. Estos *throughputs* se obtuvieron a partir del escenario que se mostró en la figura 4.1.

Tabla 4.3 *Throughputs* del centro y borde de la celda

Celda 2	Servicio	Enlace	Portadora	Throughput de Canal [Kbps]	Throughput de Usuario [Kbps]
Centro de la celda	Videoconferencia	UL	16 QAM 3/4	14785.75	3331.66
		DL	64 QAM 3/4	28134.82	5912.77
Borde de la celda	Navegación Web	UL	QPSK 1/3	3741.86	1015.35
		DL	QPSK 1/3	3696.59	1084.55

Tal como se esperaba, las condiciones de canal en el centro de la celda son mas favorables que para el borde, haciendo que el *throughput* de canal mejore y por ende el *throughput* de usuario. Cabe resaltar, que debido a que los usuarios de la tabla son los únicos asociados a la celda 2 el *throughput* de la celda se distribuye

únicamente en dos usuarios, por lo cual el *throughput* asignado a estos es bastante alto.

A partir de este punto se trabajó con la proyección de usuarios a futuro mencionada en la sección 4.1, por lo cual es importante tener en cuenta que los *throughputs* por usuario van a ser menores, debido a que la capacidad de la celda se distribuye entre una mayor cantidad de usuarios. En la figura 4.2 se muestra la distribución de usuarios utilizada para los escenarios: escenario 2- efecto de la inclinación de antenas, escenario 3- efecto del reuso de frecuencias y escenario 4- efecto de la implementación de técnica MIMO.

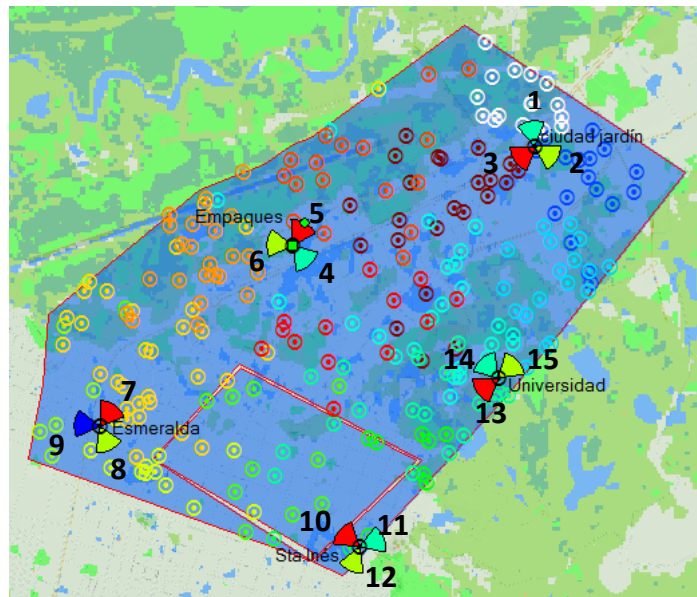


Figura 4.2 Distribución de usuarios para la red LTE diseñada

4.4 ESCENARIO 2- EFECTO DE LA INCLINACIÓN DE ANTENAS SOBRE LA CAPACIDAD

El escenario 2 de simulación se enfocó en el impacto que genera la variación de la inclinación de las antenas de las BS de toda la red, tanto para el UL como para el DL, sobre la capacidad de la red LTE diseñada para la ciudad de Popayán. Este escenario determinó, en términos de capacidad, el comportamiento de la red al asignar a todas sus antenas un *tilt* igual a 0° , para posteriormente comparar este resultado con respecto a la configuración *tilt* igual a 7° .

Este escenario permitió realizar dos tipos de análisis: el primero comparó el número de usuarios no conectados por celda especificando la razón de su



rechazo, esto con el fin de entender la incidencia del ángulo de inclinación de las antenas sobre el nivel de señal recibido en el UE y sobre la gestión y asignación de recursos que realiza el planificador PF. La segunda parte del escenario comparó los *throughputs* de celda que se obtuvieron al realizar la variación del ángulo de inclinación antes mencionada.

Las figuras 4.3 y 4.5 muestran los resultados obtenidos en términos del estado de conexión de los usuarios que intentaron acceder a la red y las figuras 4.4 y 4.6 muestran los *throughputs* por celda obtenidos para cada configuración de red.

En la figura 4.3 se puede apreciar que el estado de muy pocos usuarios es “sin servicio” y que, por el contrario, la mayor parte de usuarios fueron rechazados por “saturación del planificador”. Lo anterior significa que la relación CINR en general es buena y por lo tanto la mayoría de los UE asociados a una determinada celda, gozan de la posibilidad de asignación de recursos por parte de planificador (según la prioridad del servicio). No obstante, debido a que la capacidad de la celda es máximo 13 usuarios, los usuarios restantes serán rechazados por “saturación del planificador”.

Los *throughputs* por celda obtenidos para el UL, como lo muestra la figura 4.4, no marcan una tendencia al variar las inclinaciones de la antena, debido a que algunos de los UE cambian de celda de referencia de una simulación a otra. Por ejemplo, la celda 6 bajo la configuración de *tilt* igual a 0° presenta un *throughput* mucho mayor que el obtenido para el *tilt* igual a 7° . Lo anterior se debe a que, para el primer caso, 2 usuarios que utilizaron el servicio videoconferencia, se encontraban asociados a la celda 6, mientras que para el segundo caso dichos usuarios se asociaron a una celda diferente haciendo que el *throughput* de la celda 6 se basara únicamente en usuarios de VoIP, que en conjunto, representan un *throughput* muy bajo para la celda.

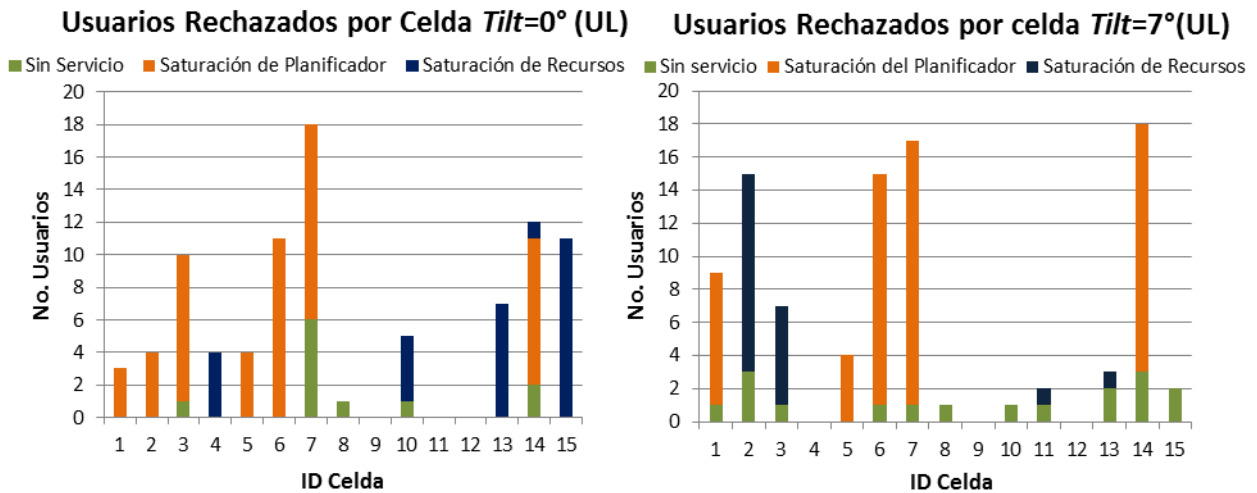


Figura 4.3 Usuarios rechazados por celda de acuerdo al *tilt* (UL)

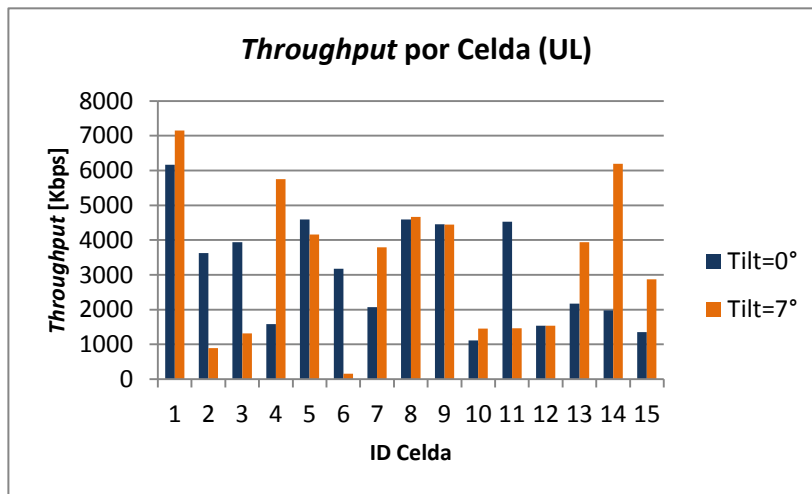


Figura 4.4 *Throughput* por celda de acuerdo al *tilt* en el UL

En la figura 4.5 es posible observar que, contrario al UL, el estado de conexión de la mayoría de usuarios en el DL es “sin servicio”, es decir, los valores de la relación CINR son inferiores al valor umbral de la portadora de menor orden (QPSK 1/3), lo cual quiere decir que las condiciones de canal son muy pobres. Sin embargo se puede notar, que para la configuración *tilt* igual a 7° , el número de usuarios “sin servicio” es inferior con respecto al caso anterior, debido a que con esta configuración, los niveles de interferencia decrecen, mejorando así las condiciones



del canal y por lo tanto el *throughput* por celda, tal como se puede apreciar en la figura 4.6. Por otro lado, existen algunas excepciones, en las que determinadas celdas no cumplen con la tendencia (entre mayor número de usuarios rechazados menor es el *throughput* por celda). En estos casos, el *throughput* por celda es mayor cuando hay mayor número de usuarios rechazados, la razón de dicho comportamiento obedece al cambio de celda que experimenta uno o más UE al variar la inclinación de las antenas. Esto implica que la celda que gana usuarios aumentará su *throughput*, mientras que en la celda que los pierde el *throughput* disminuye.

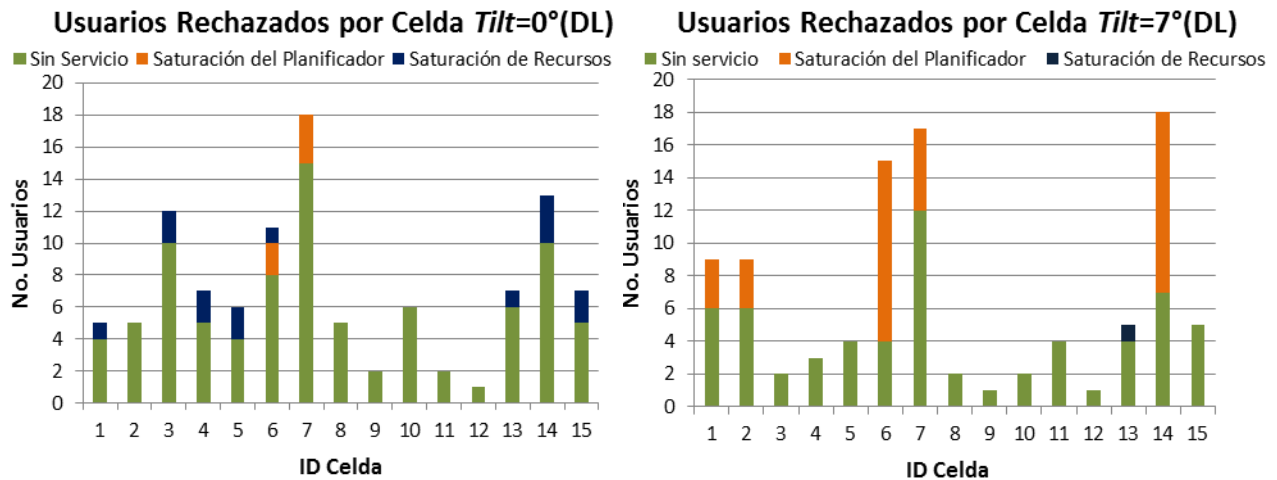


Figura 4.5 Usuarios rechazados por celda de acuerdo al *tilt* (DL)

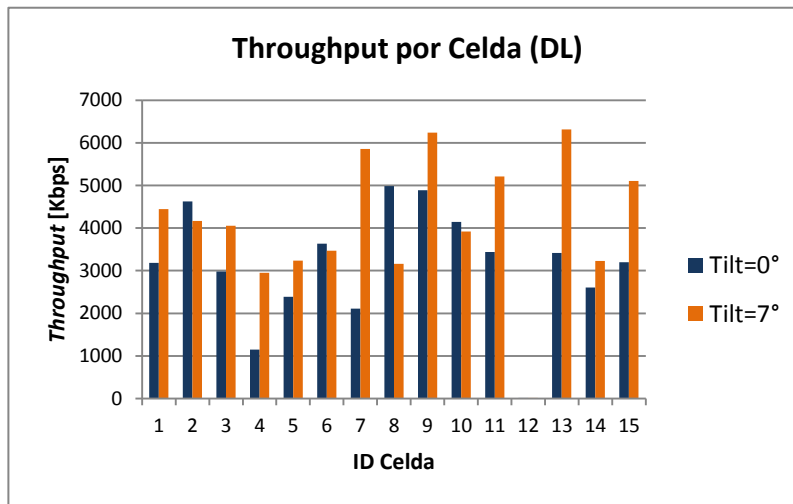


Figura 4.6 *Throughput* por celda de acuerdo al *tilt* en el DL



4.5 ESCENARIO 3- EFECTO DEL REUSO DE FRECUENCIAS SOBRE LA CAPACIDAD

El escenario 3 se basó en la incidencia que tiene la implementación de la técnica de planificación manual de frecuencias, tanto para el UL como para el DL, sobre la capacidad de la red LTE diseñada para Popayán. Para este fin, se compararon los resultados de capacidad obtenidos para las condiciones iniciales de la red (*tilt* igual a 0°) con el plan manual de frecuencias (MFP) realizado en el capítulo 3. El plan de frecuencias utilizado consta de 4 radiocanales de 10 MHz cada uno, los cuales se establecieron basándose en los 40 MHz disponibles para la banda AWS. Cabe resaltar que esta configuración se realizó utilizando en todas las antenas un *tilt* igual a 0°.

Así como en el escenario 2, este escenario permitió realizar dos tipos de análisis: el primero comparó el número de usuarios no conectados por celda especificando la razón de su rechazo y el segundo comparó los *throughputs* de celda que se obtuvieron al utilizar el plan manual de frecuencias.

La figura 4.7 muestra los resultados obtenidos en términos del estado de conexión de los usuarios que intentaron acceder a la red y las figuras 4.8 y 4.9 muestran los *throughputs* por celda obtenidos para cada configuración de red.

En la figura 4.7 es evidente la mejora en DL al implementar reuso de frecuencias con respecto a las condiciones iniciales de la red e incluso al utilizar un *tilt* igual a 7°. En otras palabras, los niveles de interferencia inter-celda son llevados a niveles reducidos ya que las celdas vecinas no utilizan el mismo rango de frecuencias y por lo tanto los valores de CINR mejoran considerablemente. Como consecuencia de esto, el número de usuarios “sin servicio” disminuye notablemente con respecto a la configuración *tilt* igual a 0°.

En cuanto al UL, el estado de conexión de los usuarios es muy similar al obtenido con la configuración *tilt* igual a 0°, ya que la interferencia inter-celda es mínima debido a la limitación en potencia del UE. Vale la pena resaltar, que el inconveniente en el UL para los dos escenarios no han sido los niveles de CINR, ya que como se puede observar, los usuarios “sin servicio” son escasos, mientras que los rechazados por “saturación del planificador” son considerables.

En las figuras 4.8 y 4.9 es notable la mejoría del *throughput* por celda que se obtiene al realizar plan de frecuencias. Lo anterior debido a que para la configuración inicial se reparte el ancho de banda (10 MHz), de un único radiocanal, entre todos los usuarios, mientras que con MFP se recurre a un mayor



ancho de banda, es decir, 4 radiocanales de 10 MHz cada uno, lo cual tiene como consecuencia un sacrificio de la eficiencia espectral.

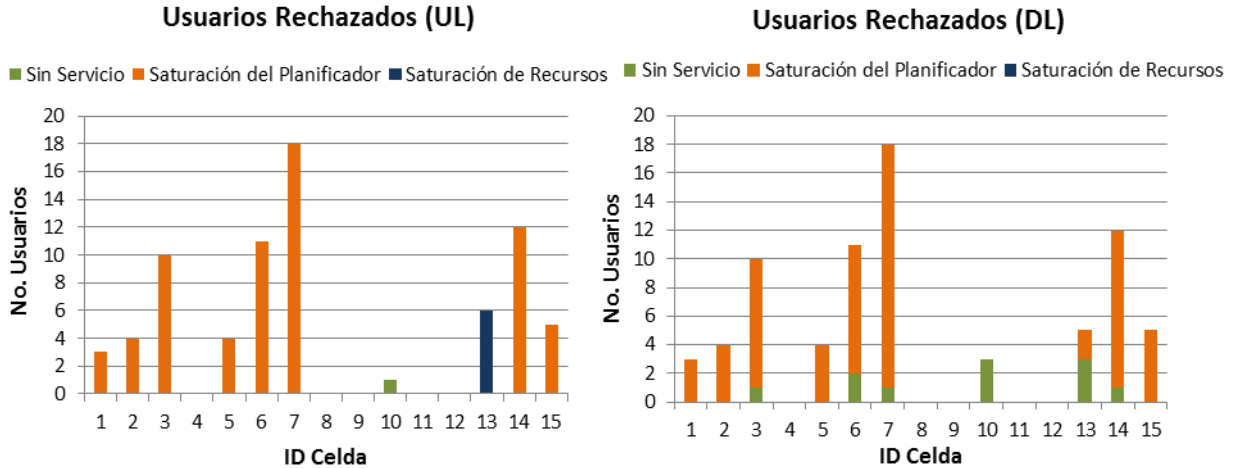


Figura 4.7 Usuarios rechazados por celda utilizando reuso de frecuencias

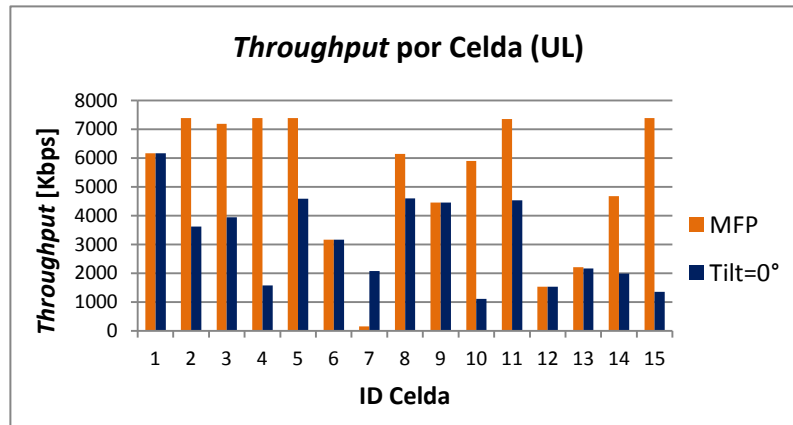


Figura 4.8 Throughput por celda utilizando reuso de frecuencias en el UL

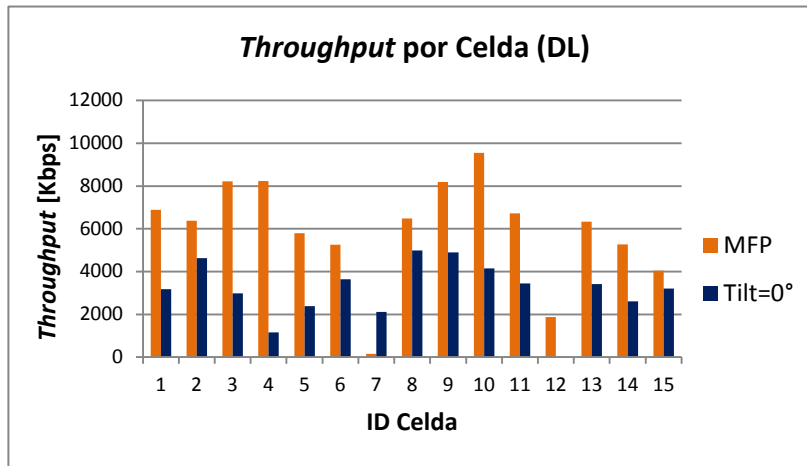


Figura 4.9 *Throughput* por celda utilizando reuso de frecuencias en el DL

Cabe resaltar que los *throughputs* de la mayoría de celdas en el DL son más altos que en el UL, lo cual era de esperarse ya que las demandas de *throughput* en el DL son mayores y por lo tanto suman más al *throughput* de las celdas. Sin embargo, esto no se cumple para algunas celdas debido a que en estas, los *throughput* de canal en el UL son mayores que para el DL, debido a que los niveles de CINR del UL son más altos. Lo anterior implica que los *throughput* por usuario en el UL son mayores y por lo tanto el de la celda también es mayor. En este sentido, los *throughputs* de usuario representan un mayor porcentaje (del *throughput* de canal) de tráfico en el DL que en el UL, tal como se muestra en el ejemplo de la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Ejemplo de porcentaje de tráfico en el UL y DL

Celda 15	CINR [dB]	<i>Throughput</i> de Canal [Kbps]	<i>Throughput</i> de usuario [Kbps]	(%)
UL	15.6	15563.95	799.65	5.13
DL	1.46	3741.86	492.07	13.15

Debido a la amplia diferencia entre el *throughput* de canal del UL y DL, los *throughputs* de usuario más bajos representan un porcentaje del *throughput* de canal más alto para la asignación de recursos. Lo anterior implica que para el DL se agotan más rápidamente los recursos disponibles (de acuerdo a la ecuación 4.4 o 4.11, dependiendo del caso) ya que son más limitados que en el UL.



4.6 ESCENARIO 4- EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS MIMO SOBRE LA CAPACIDAD

El escenario 4 de simulación se enfocó en el impacto que genera la implementación de las técnicas MIMO, tanto para el UL como para el DL, sobre la capacidad de la red LTE diseñada para la ciudad de Popayán. Para este fin, se determinó en términos de capacidad, el comportamiento de la red al implementar SU-MIMO²³, para posteriormente comparar este resultado con respecto a la implementación de diversidad en transmisión y recepción²⁴. Cabe resaltar que esta configuración se realizó utilizando en todas las antenas un *tilt* igual a 0°.

Al igual que en los demás escenarios, este permitió realizar dos tipos de análisis: el primero comparó el número de usuarios sin conexión por celda especificando la razón de su rechazo. El segundo comparó los *throughputs* de celda que se obtuvieron en las condiciones iniciales de la red con los obtenidos al implementar dos técnicas MIMO por separado. Lo anterior con el fin de observar el efecto de MIMO sobre la capacidad de cada sector.

Las figuras 4.10 y 4.12 muestran los resultados obtenidos en términos del estado de conexión de los usuarios que intentaron acceder a la red mientras que las figuras 4.11 y 4.13 muestran los *throughputs* por celda obtenidos para cada una de las configuraciones de red mencionadas en este escenario.

En las figuras 4.10 a) y 4.12 a), es posible observar que el comportamiento de la red al utilizar SU-MIMO, es exactamente el mismo que el obtenido para las condiciones iniciales de la red (*tilt* igual a 0°), tanto para el UL como para el DL. Lo anterior debido a que, en primera instancia, la técnica SU-MIMO se utiliza para incrementar la capacidad y no para incrementar cobertura, por lo tanto los niveles de CINR siguen siendo los mismos que para las condiciones iniciales [28].

En segunda instancia, utilizando la técnica SU-MIMO con M antenas de transmisión y N de recepción, el *throughput* puede llegar a incrementarse M o N veces, dependiendo cual de los dos sea el menor. Para el caso del UL es un sistema 1x2 lo cual quiere decir que el *throughput* no se incrementa [28], tal como lo muestra la figura 4.11.

En la figura 4.10 b), es posible observar una pequeña mejoría en cuanto al número de usuarios “sin servicio” que se presenta al utilizar la técnica de diversidad en

²³ Permite transmitir diferentes señales a través de dos o más antenas, por lo que su contribución es a la capacidad de la celda.

²⁴ Contribuye al balance del enlace, por lo que la ganancia por diversidad aumenta el alcance de las portadoras.

recepción, comparado con los resultados obtenidos en las condiciones iniciales de la red (figuras 4.3). De igual manera, el número de usuarios rechazados por “saturación de recursos” disminuye lo cual significa que al menos las demandas mínimas de los usuarios se cumplen. Estas mejoras se deben al incremento que la técnica de diversidad genera sobre los niveles de CINR y por ende los usuarios se conectan con mayor *throughput*, lo cual se traduce en el incremento del *throughput* por celda, como se muestra en la figura 4.11.

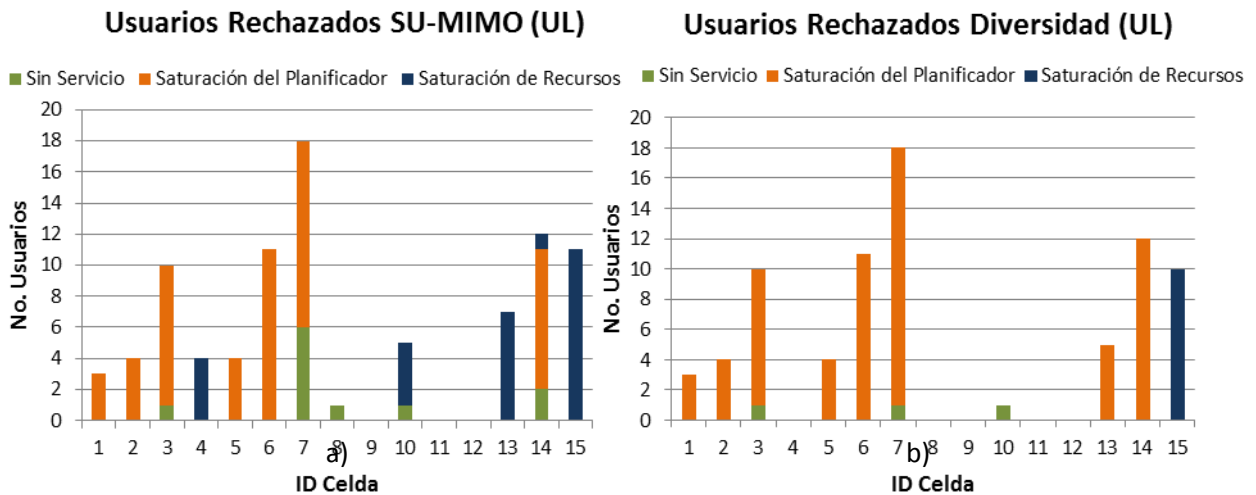


Figura 4.10 Usuarios rechazados por celda de las técnicas MIMO

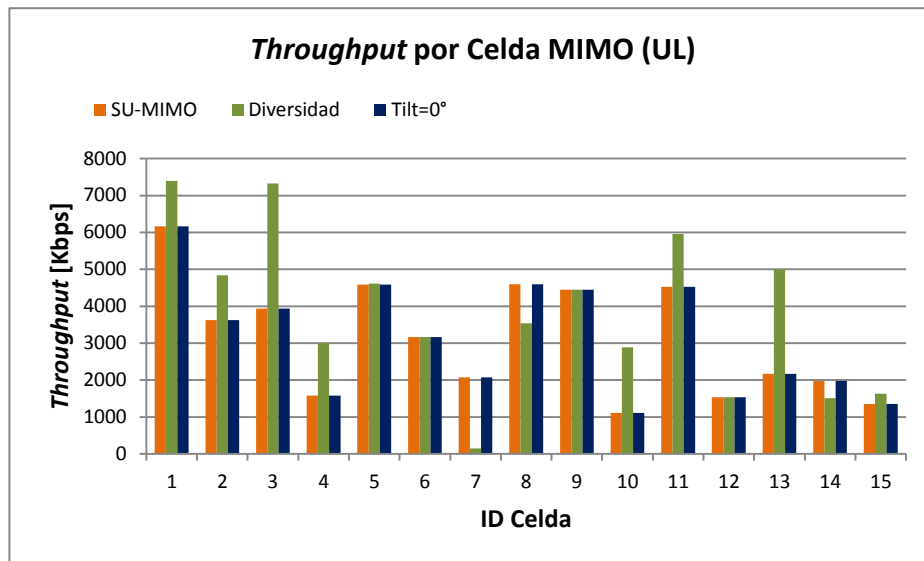


Figura 4.11 Throughput por celda de las técnicas MIMO en el UL



En la figura 4.12 b), se puede observar que el número de usuarios “sin servicio” es menor que para las condiciones iniciales o lo que es igual, para la configuración de red SU-MIMO. Esta mejora se debe a que gracias a la implementación la técnica de diversidad en transmisión, el nivel de la señal en recepción es más resistente a interferencias, tal como se analizó en el capítulo 3.

Contrario a lo ocurrido en el UL, al implementar la técnica SU-MIMO en el DL, los *throughputs* por celda mejoran de manera notable, como se muestra en la figura 4.13. Lo anterior debido a que en este enlace se utiliza un sistema MIMO 2x2 lo cual hace que el *throughput* se incremente a casi el doble de los *throughputs* obtenidos en sistemas de flujo simple. Cabe resaltar que esta técnica es utilizada en regiones donde las condiciones del canal son lo suficientemente buenas, por esta razón la figura 4.13, presenta en algunas de las celdas, un *throughput* más bajo que para las otras condiciones de red.

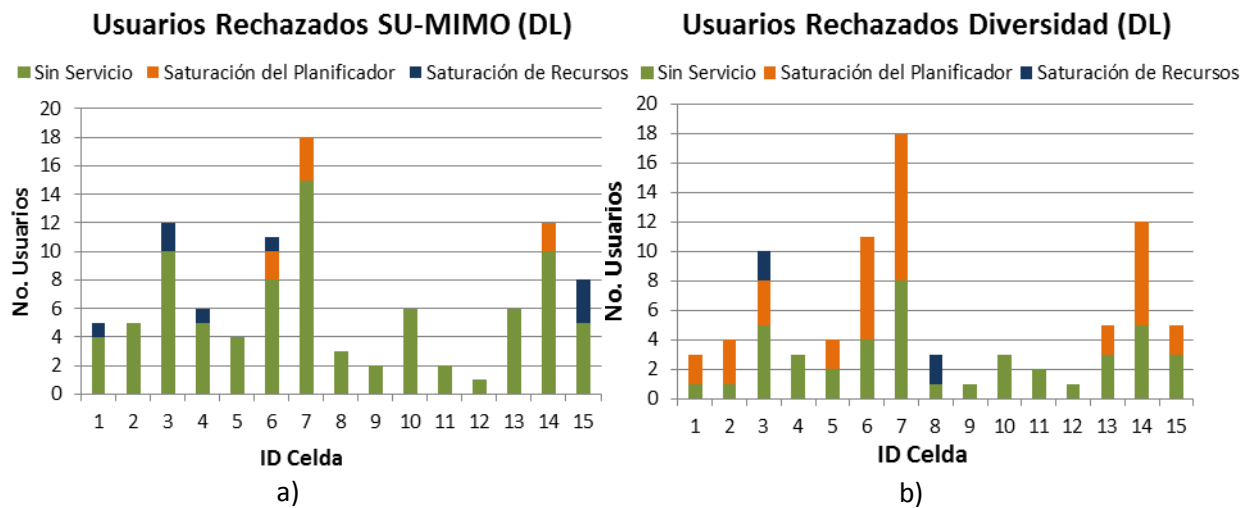


Figura 4.12 Usuarios rechazados por celda al implementar MIMO

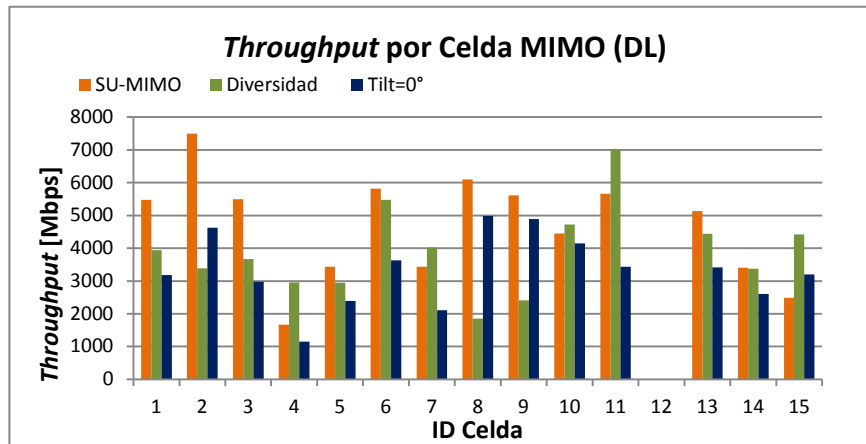


Figura 4.13 *Throughput* por celda de las técnicas MIMO en el DL

La tabla 4.5 resume la cantidad de usuarios, en toda la red, que alcanzan la demanda máxima de *throughput* en cada una de las configuraciones establecidas en los escenarios del 2 al 4. Cabe recordar que estas demandas son las que fueron definidas en la sección 4.1.2 consideraciones de servicios.

Tabla 4.5 Número de usuarios que alcanzan la demanda máxima de *throughput*

	Enlace	Navegación Web	VoIP	Videoconferencia
<i>Tilt</i> 0°	DL	2	46	0
	UL	5	72	3
<i>Tilt</i> 7°	DL	2	53	2
	UL	9	75	10
MFP	DL	5	68	4
	UL	15	80	6
Diversidad	DL	2	62	0
	UL	9	79	3
SU-MIMO	DL	5	45	1
	UL	5	76	3

La tabla 4.6 resume el número de usuarios de acuerdo al estado de conexión y en el caso de los no conectados, el motivo de su rechazo. Cabe resaltar que el número total de usuarios intentando acceder a la red es 230.



Tabla 4.6 Estado de los usuarios por enlace de acuerdo a cada escenario

	Enlace	Sin Servicio	Saturación del Planificador	Saturación de Recursos	Conectado
Tilt 0°	DL	85	5	13	127
	UL	9	51	25	145
Tilt 7°	DL	59	32	1	138
	UL	15	54	20	141
MFP	DL	10	64	0	156
	UL	1	65	6	158
Diversidad	DL	41	38	4	147
	UL	3	63	9	155
SU-MIMO	DL	83	7	8	132
	UL	9	51	25	145

De las tablas 4.5 y 4.6 se puede concluir que la mejor configuración de red es MFP ya que mayor cantidad de usuarios alcanzan la máxima demanda de *throughput* y además, un mayor número de usuarios se encuentran conectados a la red. Sin embargo, esta técnica sacrifica la eficiencia espectral y además sigue dejando alrededor del 30% de usuarios sin conexión.

4.7 ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y COBERTURA PARA EL DISEÑO FINAL DE LA RED LTE

A pesar de que se implementaron diversas estrategias para incrementar la capacidad, el número de usuarios sin conexión (independientemente del motivo) sigue siendo considerable. Esto conlleva a la necesidad de aumentar el número de estaciones base que permitan incrementar la capacidad de la red diseñada, tal como se determinó teóricamente al final del capítulo 2.

Cabe resaltar que la red diseñada inicialmente, cumple con los objetivos de cobertura planteados teóricamente en el balance del enlace pero debido a que este no tiene en cuenta la capacidad, se llega a la conclusión de que 5 sitios no son suficientes para brindar conexión al número total de usuarios que se intentan conectar simultáneamente (230), es decir, para cumplir con los requerimientos de capacidad se adicionaron dos estaciones base.

En este orden de ideas, la última parte del análisis de capacidad se enfocó en plantear el diseño final de la red LTE, en donde se buscó establecer un equilibrio



entre capacidad y cobertura. En vista de que las estaciones base se ubicaron teniendo en cuenta la infraestructura ya existente del operador TIGO, las 2 nuevas estaciones base se ubicaron en el centro de la ciudad, más específicamente en el edificio del Instituto Técnico ComfacaUCA (ITC), y en la zona de la ciudad conocida como Coliseo La Estancia.

La configuración utilizada para el diseño final fue MFP ya que a pesar de que se sacrifica la eficiencia espectral, los niveles de interferencia se mitigan en mayor proporción que en otras técnicas analizadas. Sin embargo, al adicionar las dos estaciones base la interferencia se incrementó por lo que el plan de frecuencias con el que se trabajó en el escenario y en el capítulo 3 debió ser modificado.

La figura 4.14 muestra el diseño final de la red LTE para la zona de mayor demanda para la ciudad de Popayán. La tabla resumen del *throughput* por red especificando cada uno de los servicios se encuentra en la sección B.6 del anexo B.

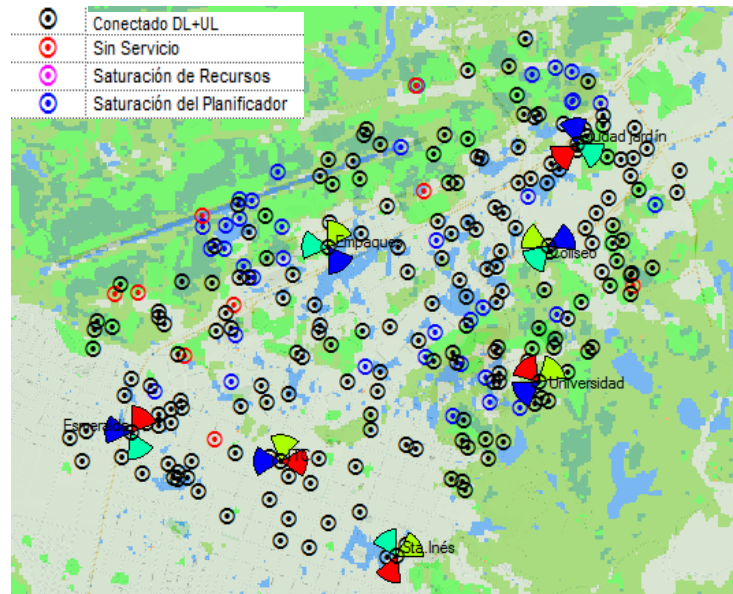


Figura 4.14 Diseño final de la red LTE para la ciudad de Popayán

Como se puede observar, la mayor parte de usuarios se encuentran conectados tanto en el UL como el DL, sin embargo, aunque este diseño mejora la relación CINR, aún persiste el problema de usuarios “sin servicio” en el borde de la celda, donde existen mayores problemas de interferencia.



En la figura 4.14, se puede observar además, que algunos usuarios quedaron sin conexión debido a saturación del planificador, dado que, para mantener altos niveles de *throughput* por usuario, la celda se limitó a un número máximo de 13 usuarios con el fin de que la capacidad de la celda se distribuyera en una cantidad limitada de usuarios y no sobre todos los usuarios asociados a cada sector. Es decir, si se limita el número de usuarios que cada celda puede atender, se garantiza un mayor *throughput* para cada uno de ellos, por el contrario si no se limita habrá más cobertura de los usuarios pero con menor capacidad, como se muestra en la figura 4.15.

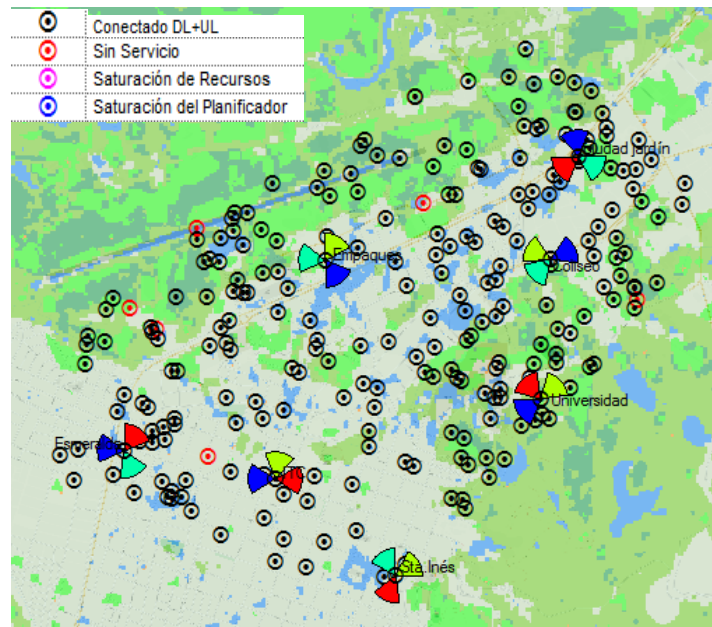


Figura 4.15 Alternativa diseño final de la red LTE para la ciudad de Popayán

La tabla 4.7 compara los resultados del diseño final y el alternativo y se enfoca en la consecuencia que tiene sobre la capacidad, el no limitar el número de usuarios por celda. Para observar el *throughput* por usuario se tomó como ejemplo uno de los usuarios, asociado al sector 1.



Tabla 4.7 Comparación diseño final y alternativo

Diseño	No. Usuarios “sin servicio”	No. Usuarios “saturación de planificador”	Usuarios conectados (%)	Throughput de usuario UL [Kbps]	Throughput de usuario DL [Kbps]
Final	9	36	80	1520.95	2346.50
Alternativo	6	0	97	669.15	1217.86

Como se puede observar en la tabla 4.7, al no limitar los usuarios por celda la cobertura de toda la red mejoró notablemente, sin embargo se presenta una notable disminución en el *throughput* por usuario. Cabe resaltar, que este comportamiento no se presenta en la misma medida en todos los usuarios ya que depende de la cantidad de usuarios asociados a cada celda y de la prioridad del servicio con la que intentan establecer la conexión.

Lo anterior muestra que si se incrementa la cobertura disminuye la capacidad y viceversa, por lo que debe existir un compromiso entre las dos. En vista de que el objetivo primordial de LTE es ofrecer a los usuarios altas velocidades de transmisión de datos, la red LTE diseñada para Popayán se adecuó a estos requerimientos, por lo que se prefiere el diseño final planteado en la figura 4.14.

En caso de que se prefiera aumentar tanto capacidad como cobertura, se debe adicionar otras estaciones base que suplan la necesidad de sacrificar capacidad por cobertura o viceversa, es decir, al contar con más estaciones base se obtendrán *throughputs* de usuario altos y además, se podría cubrir la totalidad de los usuarios. Es importante tener en cuenta que lo anterior es posible haciendo uso de estaciones base de baja potencia (femtoceldas), y como consecuencia, se requeriría mayor número de femtoceldas para cubrir un área que normalmente sería cubierta por una macro-celda.



5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este capítulo se presentan las conclusiones que se obtuvieron al desarrollar este trabajo de grado, además se enuncian algunas ideas sobre trabajos futuros que se podrían realizar en base a este trabajo de grado.

5.1 CONCLUSIONES

- La relación señal a ruido, la cual identifica las condiciones de canal, resulta ser el parámetro base para realizar el cálculo del balance del enlace, y con él determinar el número de sitios que componen el diseño de la red móvil LTE.
- Los valores de CINR son determinantes para llevar a cabo el proceso de asignación de recursos ya que estos brindan información sobre las condiciones de canal de cada usuario, esto implica que los usuarios con mayores valores de CINR obtendrán mayores recursos que aquellos que presenten bajas condiciones de canal.
- La implementación de un plan de frecuencias con un factor de reuso igual a 4 favorece el aumento tanto de capacidad como de cobertura ya que utiliza 4 radiocanales de 10 MHz cada uno. Como resultado de esta implementación se mitiga la interferencia, se mejoran las condiciones de canal y se logran velocidades de transmisión altas durante la hora pico. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la inversión en cuanto a espectro se incrementa en gran medida.
- A pesar de que los esquemas de diversidad en transmisión son importantes para mejorar la cobertura de la red, requieren inversiones más altas y una mayor complejidad en los UE debido a que requieren un mayor número de antenas y un mayor procesamiento de las señales. Además, esta técnica no mejora la capacidad de la red por lo que no se consideró viable teniendo en cuenta que los requerimientos de velocidad de transmisión, para sistemas LTE, son ambiciosos.
- La variación de ángulos de inclinación de antena como mecanismo de mitigación de interferencia, determinó que al utilizar un ángulo de 7° , la red presenta un mejor equilibrio entre capacidad y cobertura en comparación con los resultados obtenidos para un ángulos de 4° y de 14° sin sacrificar eficiencia espectral y sin incurrir en costos adicionales. Sin embargo su contribución a la capacidad y cobertura no supera la técnica de planeación de frecuencias.



- La técnica SU-MIMO incrementó la capacidad de la red únicamente para usuarios con altos niveles de CINR y además, no contribuyó a la red diseñada en términos de cobertura en comparación con las condiciones iniciales (*tilt* igual a 0°).
- El diseño final de la red combinó la técnica de planeación de frecuencias con la inclinación de antena igual a 7° para establecer un equilibrio óptimo entre la capacidad y cobertura de la red. Este diseño logró altas velocidades de transmisión en la BH al costo de sacrificar la cobertura para un pequeño porcentaje de usuarios, mientras que el diseño alternativo sacrificó la capacidad por brindar mayor cobertura a los usuarios de la red. Lo anterior evidencia el compromiso que debe existir entre capacidad y cobertura antes de realizar la implementación física de la red.

5.2 TRABAJO FUTURO

En esta sección se plantean 5 ideas de posibles trabajos que tienen como objetivo complementar el presente trabajo de grado.

- Diseñar y realizar el análisis de capacidad y cobertura para la expansión de la red LTE en la ciudad de Popayán.
- Diseñar e implementar un simulador a nivel de enlace para determinar el *throughput* de celda a partir de la eficiencia espectral, distancia entre sitios y anchos de banda.
- Análisis comparativo del desempeño de las estrategias disponibles de planificación de paquetes sobre una red LTE.
- Análisis de capacidad y cobertura de una red LTE al implementar sistemas MU-MIMO y equipos terminales con 2 antenas de recepción.
- Análisis del desempeño a nivel de sistema de una red móvil LTE utilizando femtoceldas.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rhode and Schwarz, “UMTS Long Term Evolution (LTE) Technology Introduction”, Septiembre de 2008 [Online]. Disponible en: www2.rohde-schwarz.com/file_10948/1MA111_2E.pdf. [Visitado Jun. 10, 2011].
- [2] LTEPortal, “The LTE Guide”, Mayo 2011 [Online]. Disponible en: http://www.gsacom.com/downloads/pdf/GSA_Evolution_to_LTE_report_11071_2.php4. [Visitado Julio 10, 2012].
- [3] 3GPP, “Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)”, TS 25913, Marzo de 2012 [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25913.htm>. [Última visita: Abril de 2012].
- [4] Ericsson, “LTE: an Introduction”, 2011 [En línea]. Disponible en: www.ericsson.com/res/docs/2011/lte_an_introduction.pdf. [Última visita: Abril de 2012].
- [5] A. Miñaro, “LTE/SAE, una apuesta segura en la evolución de las redes móviles”, Junio de 2009 [En línea]. Disponible en: http://coitt.es/res/revistas/08c_Rep_LTE_MN3.pdf. [Última visita: Abril de 2012].
- [6] Rohde & Schwarz, “UMTS Long Term Evolution Technology Introduction”, Marzo de 2007 [En línea]. Disponible en: http://www.3g4g.co.uk/Lte/LTE_WP_0703_RandS.pdf. [Última visita: Abril de 2012].
- [7] V. Torres, F. Esparza y F. Falcone, “Análisis del comportamiento de esquemas de modulación adaptativos en LTE”, Universidad pública de Navarra, Pamplona, España. [En línea]. Disponible en: www.csm.unavarra.es/Publicaciones/Images/Pub587.pdf. [Última visita: Abril de 2012].
- [8] R.A. Comes, F.B. Álvarez, F.C. Palacio, R.F. Ferré, J. Pérez y O. Sallent, “LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles”, España: Fundación Vodafone España, 2010, páginas 190 y 202.



- [9] C. Hernández y V. Quintero, “Nivel Físico LTE”, Diciembre de 2011 [En línea]. Disponible en: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/LTE/LTE.htm>. [Última visita: Abril de 2012].
- [10] J. Patel “LTE MIMO Concepts”, Junio de 2010 [En línea]. Disponible en: <http://4gwirelessjobs.com/articles/article-detail.php?LTE-MIMOConcepts&Arid=MTQz&Auid=OTY>. [Última visita: Abril de 2012].
- [11] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, “Espectro Radioeléctrico”, Marzo de 2012 [En línea]. Disponible en: www.mintic.gov.co/index.php/espectro. [Última visita: Abril de 2012].
- [12] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, “Borrador de resolución para la implementación de 4G”, Marzo de 2012 [En línea]. Disponible en: www.mintic.gov.co/index.php/mn-news/893-el-ministerio-tic-publica-para-comentarios-el-borrador-de-resolucion-para-implementacion-de-4g. [Última visita: Abril de 2012].
- [13] UNE Comunicaciones, “Hito para Latinoamérica: UNE y Huawei firman contrato para implementación de la primera fase de la red 4G LTE en Colombia” [En línea]. Disponible en: <http://www.une.com.co/saladeprensa/index.php/noticias/une-epm-telecomunicaciones/965-hito-para-latinoamerica-une-y-huawei-firman-contrato-para-implementacion-de-la-primera-fase-de-la-red-4g-lte-en-colombia.html>. [Última visita: Abril de 2012].
- [14] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception” TS 36.101, Marzo de 2012 [En línea]. Disponible en: www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36101.htm. [Última visita: Abril de 2012].
- [15] 3GPP, “All-IP Network (AIPN) feasibility study” TS 22.98, Enero de 2009 [En línea]. Disponible en: http://pda.etsi.org/pda/copy_file.asp. [Última visita: Abril de 2012].
- [16] P. Panigrahi, “Introduction to LTE”, Noviembre 10 de 2009 [En línea]. Disponible en: <http://www.3glteinfo.com/lte/introduction-to-lte>. [Última visita: Abril de 2012].
- [17] R. Zartenar, R. Klüber y T. Hamann, “LTE/SAE: Drivers, Benefits and Challenges”, Noviembre 2 de 2011 [En línea]. Disponible en:



<http://es.scribd.com/doc/78094470/P3-Communications-LTE-White-Paper>.

[Última vista: Abril de 2012].

- [18] R. Checker, White Paper “Mobility Management Entity in LTE/EPC Networks”, Febrero de 2011 [En línea]. Disponible en: http://www.tellabs.com/resources/papers/tlab_mme_wp.pdf. [Última visita: Abril de 2012]
- [19] J.J Padilla, “Sistemas móviles celulares”, Marzo de 2010 [En línea]. Disponible en: <http://jpadilla.docentes.upbbga.edu.co/moviles/10%20SISTEMAS%20MOVILES%20CELULARES.pdf>. [Última visita: Abril de 2012]
- [20] R. Domínguez, “Métodos para el aumento de la capacidad UMTS en Atoll”, tesis de pregrado, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, Marzo de 2009 [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11744/fichero/Capitulo4%252Fcapitulo4.pdf>. [Última visita: Abril de 2012].
- [21] Aritza Networks, “Requeriment for LTE”, Febrero de 2012 [En línea]. Disponible en: http://www.artizanetworks.com/lte_tut_req_lte.html.
- [22] Huawei, “LTE: Radio Network Planning Introduction” [En línea]. Disponible en: student.eepis-its.edu/~raisputra/LTE/11%20LTE%20Radio%20Network%20Planning%20Introduction.pdf. [Última visita: Abril de 2012].
- [23] LTE Encyclopedia, “LTE Radio Link Budgeting and RF Planning”, [En línea]. Disponible en: <http://sites.google.com/site/lteencyclopedia/lte-radio-link-budgeting-and-rf-planning>. [Última visita: Abril de 2012].
- [24] M. L. Belhouchet y M. H. Ebdelli, “LTE Technology Performance Evaluation”, Enero de 2010 [En línea]. Disponible en: http://www.itu.int/ITU-D/arb/COE/2010/4G/Documents/Doc6-LTE%20Workshop_TUN_Session5_Performance%20Evaluation.pdf. [Última visita: Abril de 2012].
- [25] R. Domínguez, “Métodos para el aumento de la capacidad UMTS en Atoll”, tesis de pregrado, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, Marzo de 2009 [En línea]. Disponible en:



<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11744/fichero/Capitulo4%252Fcapitulo4.pdf>. [Última visita: Abril de 2012].

- [26] Forsk, “Atoll RF Planning & Optimization Software - Brochure”, Febrero de 2009 [En Línea]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/40399984/r100-10-atoll-2-8-hd>. [Última visita: Abril de 2012].
- [27] Forsk, “Atoll RF Planning & Optimization Software - User Manual”, Febrero de 2009 [En Línea]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/68477624/User-Manual>. [Última visita: Abril de 2012].
- [28] C. Hernández y V. Quintero, “Desempeño de LTE”, Enero de 2012 [En línea]. Disponible en: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/LTE/Capitulo%205%20x6.pdf>. [Última visita: Abril de 2012].
- [29] H. Holma y A. Toskala, *LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, Finlandia: Nokia Siemens Networks, 2009.
- [30] 3GPP, “User Equipment (UE) radio transmission and Reception (Release 8)” TR 36803-110, Abril de 2008 [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36803.htm>. [Última visita: Abril de 2012].
- [31] 3GPP, “Base station (BS) radio transmission and reception” TS 36.104, Diciembre de 2011 [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36104.htm>. [Última visita: Abril de 2012].
- [32] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Radio Frequency (RF) System Scenarios” 3GPP TR [36.942](#), Octubre de 2010 [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36942.htm>. [Última visita: Abril de 2012].
- [33] J.Gu y R.Sheng, “ZTE Research on LTE Network Coverage Planning”, Octubre de 2011 [En línea]. Disponible en: www.zte.com.cn/endata/magazine/ztecommunications/2011Year/no3/articles/201110/t20111029_260204.html. [Última visita: Abril de 2012].
- [34] A. Basit, “Description of Models and Tool, Coverage and Capacity Estimation of 3GPP LTE radio interface”, tesis de maestría Universidad Tecnológica de



- Helsinki, Finlandia Febrero de 2009, página 38 [En línea]. Disponible en <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100056.pdf>. [Última visita: Abril de 2012].
- [35] 3GPP, “User Equipment radio transmission and reception” TS 36.101, Diciembre de 2011, página 54 [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36101.htm>. [Última visita: Abril de 2012].
- [36] 3GPP, “Base Station (BS) Radio transmission and reception (Release 8)” TS36.104, Junio de 2011, páginas 46-51 [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36104.htm>. [Última visita: Abril de 2012].
- [37] C. Vega, “Introducción a los Sistemas de Telecomunicación”, Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria, noviembre de 2011 [En línea]. Disponible en: http://personales.unican.es/perezvr/pdf/CH8ST_Web.pdf. [Última visita: Mayo de 2012].
- [38] D. García, “Algoritmo de Calendarización de Servicios Multimedios utilizando Tecnología WiMAX”, tesis de maestría CICESE, México, Marzo de 2010 [En línea]. Disponible en: biblioteca.cicese.mx/catalogos/tesis/download.php?id=18331. [Última visita: Abril de 2012].
- [39] A. Basit, “Description of Models and Tool, Coverage and Capacity Estimation of 3GPP LTE radio interface”, tesis de maestría Universidad Tecnológica de Helsinki, Finlandia Febrero de 2009, página 39 [En línea]. Disponible en <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100056.pdf>. [Última visita: Abril de 2012].
- [40] El tiempo, “Comienza carrera por cuatro licencias para internet 4G en el país”, Marzo de 2012 [En línea]. Disponible en: http://www.eltiempo.com/tecnologia/internet/ARTICULO-WEB-NEW_NOTA_INTERIOR-11406302.html. [Última visita: Mayo de 2012].
- [41] Agilent Technologies Knowledge Center, SystemVue 2011.03, Agilent Technologies, 2011.
- [42] 3GPP, “MBSFN Simulation Results; TSG-RAN WG4 Meeting Ad hoc#1” R4-100038, Enero de 2010 [En línea]. Disponible en:



www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG4_Radio/TSGR4_AHs/R4_AH1_SophiaAntipolis_Jan_2010/Docs/R4-100038.zip. [Última visita: Mayo de 2012].

- [43] Freescale, “Long Term Evolution Protocol Overview”, White paper, Octubre de 2008 [En línea]. Disponible en: www.freescale.com/files/wireless_comm/doc/white_paper/LTEPTCLOVWWP.pdf. [Última visita: Mayo de 2012]
- [44] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures” TS 36.213, Septiembre de 2009 [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36213.htm>. [Última visita: Mayo de 2012].
- [45] P. Martínez, “Cálculo de errores. Error absoluto y relativo”, Abril de 2008 [En línea]: Disponible en: http://platea.pntic.mec.es/pmarti1/educacion/3_eso_materiales/b_i/conceptos/conceptos_bloque_1_3.htm#errores_experimentales. [Última visita: Junio de 2012].
- [46] Technology Training Limited, “Carrier to Interference plus Noise Ratio” [En línea]. Disponible en: <http://www.technology-training.co.uk/cinr.php>. [Última visita: Junio de 2012].
- [47] Javvin, “Carrier to Interference + Noise Ratio”, [En línea]. Disponible en: <http://www.javvin.com/wireless/CINR.html>. [Última visita: Junio de 2012].
- [48] L. Zhang, “Network Capacity, Coverage Estimation and Frequency Planning of 3GPP Long Term Evolution”, Tesis de maestría Instituto de Tecnología Lingöpings, Suecia Septiembre de 2010, página 16, [En línea]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/53754871/12/Adaptive-Modulation-and-Coding-AMC>. [Última visita: Junio de 2012].
- [49] V. Pauli, J. Naranjo and E. Seidel, “Heterogeneous LTE Networks and Inter-Cell Interference Coordination”, Normor Research, Munich, Alemania Diciembre de 2010 [En línea]. Disponible en: http://www.nomor.de/uploads/a4/81/a4815c4dc585be33c81f0ec7a15deed7/2010-12-WhitePaper_LTE_HetNet_ICIC.pdf. [Última visita: Junio de 2012].
- [50] I. Forkel, A. Kemper, R. Pabst y R.Hermans, “The Effect of Electrical and Mechanical Antenna Down-tilting in UMTS Networks”, Aachen University of Technology, Alemania Febrero de 2011 [En línea]. Disponible en:



http://www.autonomic-communication.org/teaching/ais/slides/1112/FoKePaHe_3G2002-TiltEffec%20ts.pdf. [Última visita: Junio de 2012].

- [51] F. Athley y M. Johansson, “Impact of Electrical and Mechanical Antenna Tilt on LTE Downlink System Performance”, Ericsson research, Suecia Septiembre de 2010 [En línea]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/71590833/Impact-of-Electrical-and-Mechanical-Antenna-Tilt-on-LTE-Downlink-System-Performance>. [Última visita: Junio de 2012].
- [52] J. Niemelä y J. Lempiäinen, “Impact of Mechanical Antenna Down-tilt on Performance of WCDMA Cellular Network”, Tampere University of Technology, Finlandia Marzo de 2009 [En línea]. Disponible en: <http://www.cs.tut.fi/tilt/RNG/publications/docs/topology/mtilt.pdf>. [Última visita: Junio de 2012].
- [53] V. Pauli, J.D. Naranjo y E. Seidel, “Heterogeneous LTE Networks and Inter-Cell Interference Coordination”, Nomor Research GmbH, Alemania Diciembre de 2010. Disponible en: http://www.nomor.de/uploads/a4/81/a4815c4dc585be33c81f0ec7a15deed7/2010-12-WhitePaper_LTE_HetNet_ICIC.pdf. [Última visita: Junio de 2012].
- [54] Raymaps, “Soft Frequency Reuse in LTE”, Diciembre de 2011. Disponible en: <http://www.raymaps.com/index.php/soft-frequency-reuse/>. [Última visita: Junio de 2012].
- [55] Y. Wang, “System Level Analysis of LTE-Advanced”, tesis de doctorado de la Universidad de Aalborg, Dinamarca Septiembre de 2010, página 144 [En línea]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/88208646/37/D-3-Hard-and-Fractional-Frequency-Reuse>. [Última visita: Junio de 2012].
- [56] T.D. Novlan, R.K. Ganti y J.G. Andrews, “Analytical Evaluation of Fractional Frequency Reuse for OFDMA Cellular Networks”, Enero de 2011. Disponible en: <http://arxiv.org/pdf/1101.5130.pdf>. [Última visita: Junio de 2012].
- [57] Whirlpool, “VoIP Codecs”, Octubre de 2011 [En línea]. Disponible en: http://whirlpool.net.au/wiki/voip_codecs. [Última visita: Julio de 2012].
- [58] VoiceAge, “AMR- The Ultimate Narrowband Voice Compression Standard”, Noviembre de 2011 [En línea]. Disponible en: <http://www.voiceage.com/amr.php>. [Última visita: Julio de 2012].



- [59] D. Jones, Light Reading Mobile, “Video Chat: Meet the New Data Hog”, Junio de 2010 [En línea]. Disponible en: http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=192892. [Última visita: Julio de 2012].
- [60] L. Song y J. Shen, “*Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE*”, Florida: CRC Press, 2011, página 265.
- [61] F. Davide, G. Damien and M. Navarro, “Advanced Radio Resource Management in UTRAN LTE”, Mayo de 2010 [En línea]. Disponible en: <http://vbn.aau.dk/da/projects/advanced-radio-resource-management-in-utran-lte%28d830f59e-19b0-4089-b876-5719b7cffd48%29.html>. [Última visita: Julio de 2012].
- [62] Forsk, “Atoll Radio Planning and Optimization Software - Technical Reference Guide”, 2010 [Online]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/77803997/Atoll-2-8-3-RF-Technical-Reference-Guide-E2>. [Última visita: Julio de 2012].