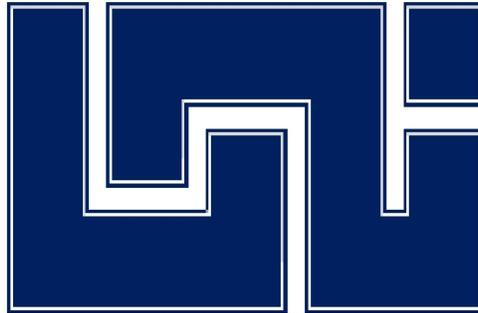


# Universidad Nacional de Ingeniería

Mon  
621.382  
R696  
2013

UNI-RUSB



*Líder en Ciencia y Tecnología*

Facultad de Electrotecnia y Computación

"Estudio experimental por simulación del diseño de una red LTE de telefonía y datos móviles en Nicaragua"

*Tesis monográfica para optar al título de Ingeniero Electrónico*

Autor: Carlos Eduardo Rodríguez Avilés.  
Tutor: Marvin Arias Olivas, Ph.D.  
Managua, Septiembre 2013



## **Dedicatoria**

*A Dios por darme la sabiduría y la fuerza necesaria para afrontar la realización de esta monografía.*

*A mis padres y mi hermano, por creer siempre en mí y apoyarme durante todo este largo proceso.*



## Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi tutor el Doctor Marvin Arias por su disposición, dedicación y orientación a lo largo de este proyecto.

Al Ing. Dmitry Yerankevich, en representación de Yota de Nicaragua, por abrir sus puertas a consultas y pruebas de campo que fueron de valioso aporte para la investigación.

A mi profesor, el Ing. Oscar Martínez, por su invaluable aporte de conocimientos para la materialización de esta monografía.

Quiero agradecer también a todos los amigos, pares académicos y profesores que hayan compartido conmigo las alegrías y dificultades de este trabajo y se han atrevido a escuchar y aportar ideas muy valiosas.



## Lista de Abreviaciones

1G	<i>Primera Generación</i>
2G	<i>Segunda Generación</i>
3G	<i>Tercera Generación</i>
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
4G	<i>Cuarta Generación</i>
aGW	<i>Access Gateway</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
ARIB	<i>Asociación de Industrias y Empresas de Radiocomunicaciones</i>
AT&T	<i>American Telephone and Telegraph</i>
ATIS	<i>Alliance for Telecommunications Industry Solutions</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CCSA	<i>China Communications Standards Association</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CEPT	<i>Conference of European Postal and Telecommunications</i>
CINR	<i>Carrier to Interference + Noise Ratio</i>
C-Netz	<i>Radio Telephone Network C</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
DL	<i>Downlink</i>
DT	<i>Download Throughput</i>
E-UTRAN	<i>Evolved- UTRAN</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for Global Evolution</i>
eNB	<i>Evolved Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
EV-DO	<i>Evolution-Data Only</i>
EV-DV	<i>Evolution for integrated Data and Voice</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>
GERAN	<i>GSM EDGE Radio Access Network</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HARQ	<i>Hybrid automatic repeat request</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber System</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>
IFFT	<i>Inverse FFT</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>



IS-54	<i>Interim Standard 54</i>
IS-95	<i>Interim Standard 95</i>
IS-136	<i>Interim Standard 136</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-R	<i>ITU Radiocommunication Sector</i>
KPI	<i>Key Performance Indicators</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
M-File	<i>Archivo de código de MATLAB®</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
NMT	<i>Nordic Mobile Telephone</i>
NTT	<i>Nippon Telegraph and Telephone</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
PDC	<i>Personal Digital Cellular</i>
PF	<i>Proportional Fair</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
POTS	<i>Plain Old Telephone Service</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RR	<i>Round Robin</i>
RSSI	<i>Relative Signal Strength Indicator</i>
RTMI	<i>Radio Telefono Mobile Integrato</i>
SAE	<i>System Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier- Frequency Division Multiple Access</i>
SD	<i>Standard Deviation</i>
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
SGSN	<i>Serving GPRS SUPPORT NODE</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SPM	<i>Standard Propagation Model</i>
TACS	<i>Total Access Communication System</i>
TD-CDMA	<i>Time Division-CDMA</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TP	<i>Transmit Power</i>
TTA	<i>Telecommunications Technology Association</i>
TTC	<i>Telecommunication Technology Committee</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UPE	<i>User Plane Entity</i>
UL	<i>Uplink</i>
UMB	<i>Ultra Mobile Broadband</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>



VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
VoLTE	<i>Voice over Long-Term Evolution</i>
W-CDMA	<i>Wideband CDMA</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WIMS	<i>WWW Interactive Multipurpose Server</i>



## **Abstract**

The rapid growth of mobile communications traffic has forced the cell phone service providers worldwide to deploy increasingly higher capacity in their wireless communications systems. In this context, the past ten years, the cell phone service providers in Nicaragua have implemented 2G and 3G networks at country level. The challenge is to address the rapid growth of data usage, caused by the increase of users who are demanding a better Quality of Service (QoS) from the cellular carriers. The elements aforementioned have conducted to the design of the next generation of cellular technology known as 4G. For this reason, the utilization of the Long Term Evolution (LTE), is interesting because this new network paradigm serves as an antechamber to 4G by including evolved mechanisms of QoS management since it provides a better network coverage and quality of signal with respect to its predecessor. LTE offers more capacity and new services, but dimensioning and deploying the network properly is important in order to maximize the performance of it. For this purpose, we have made simulations based on the MATLAB<sup>®</sup> software and the results were verified by using the multi-technology wireless network design and optimization platform, ATOLL<sup>®</sup>. The main purpose of this work is to analyze by simulation three scenarios for LTE such as: one user receiving service from a single cell site (control stage), one cell site providing service to multiple users and multiple cell sites providing service to multiple users in a system level environment. These simulations results are compared with the results of drive tests performed on a Worldwide Interoperability for Microwave Access, (WiMAX) 802.16e from the Yota Company which deployed their network in the urban zone of Managua. The results obtained demonstrate that a LTE network has better signal levels in outdoor environments, also supports a higher amount of users, meeting this way the requirements of the current telecommunications service demand. In conclusion, by means of capacity and quality of service, LTE provides the technical solution to the increase of users and the demand of mobile telephone and data service that exists in Nicaragua. However, it is still unknown if the investment in this technology will be profitable considering the purchasing power of the population.



## Resumen

El rápido crecimiento del tráfico de las comunicaciones móviles ha obligado a los proveedores de servicios de telefonía celular en todo el mundo de desplegar cada vez mayor capacidad en sus sistemas de comunicaciones inalámbricas. En este contexto, en los últimos diez años los operadores de telefonía celular en Nicaragua han implementado redes de 2G y 3G a nivel nacional. La principal dificultad es el rápido incremento de transmisión de datos, por el continuo aumento de usuarios que cada vez demandan mayores niveles de calidad de los servicios (QoS) de telecomunicaciones que ofrecen los operadores celulares. Los factores antes mencionados han conducido al diseño de la próxima generación de tecnología celular conocida como 4G. Por esta razón, la utilización de la tecnología Long Term Evolution (LTE), es interesante ya que este nuevo paradigma de red sirve de antesala para 4G al incluir mecanismos evolucionados de gestión de QoS ya que proveer mejoras en la cobertura de red y la calidad de la señal respecto a sus predecesoras. LTE ofrece una mayor capacidad y nuevos servicios, pero dimensionar y desplegar correctamente esta red es vital para maximizar su desempeño. Para tal efecto, realizamos simulaciones basadas en la herramienta MATLAB<sup>®</sup> cuyos resultados fueron verificados con el software de diseño y optimización de múltiples tecnologías inalámbricas, ATOLL<sup>®</sup>. El objetivo principal de este trabajo, es analizar por simulación tres escenarios para LTE: un usuario recibiendo servicio de una celda (escenario de control), una celda brindando servicio a múltiples usuarios y múltiples celdas con múltiples usuarios en un ambiente a nivel de sistema. Los resultados de las simulaciones las comparamos con datos de mediciones de campo realizadas en el casco urbano de Managua, en Worldwide Interoperability for Microwave Access, (WiMAX) 802.16e. Los resultados obtenidos demuestran que una red LTE tiene mejores niveles de señal en ambientes de exteriores, también soporta una carga de usuarios mayor, cumpliendo con los requerimientos de la demanda actual de servicios de telecomunicaciones. En conclusión, por capacidad y calidad de servicio, LTE provee la solución técnica al crecimiento de usuarios y la demanda de servicios de telefonía que existen en Managua. Sin embargo, queda por ver si la inversión en esta tecnología es rentable considerando el poder adquisitivo de la población.



## Lista de Figuras

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1. Generaciones de sistemas de comunicaciones móviles.	6
Figura 2. Estándares de comunicaciones móviles.	13
Figura 3. Ilustración de las capacidades de IMT-2000 e IMT-Advanced, basado en la línea de trabajo descrita en la recomendación ITU -R M.1645.	14
Figura 4. Dominio en frecuencia de las tecnologías de acceso múltiple de LTE.	17
Figura 5. Arquitectura de red LTE.	18
Figura 6. Arquitectura lógica de alto nivel para el System Architecture Evolution (SAE).	19
Figura 7. Single-cell/single-user.	22
Figura 8. Single-cell/multisuser.	22
Figura 9. Multi-cell/multiuser.	23
Figura 10. Algoritmo del procedimiento para crear un cellfile.	24
Figura 11. Ruta de Drive Test para Yota de Nicaragua.	28
Figura 12. Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN).	30
Figura 13. Soluciones de Red desde GSM hasta LTE.	31
Figura 14. Diagrama de señalización para: a) QPSK; b) 16QAM; c) 64QAM.	33
Figura 15. Parámetros K por defecto para el SPM en ATOLL®.	38
Figura 16. Algoritmo de Diseño de una red LTE.	39
Figura 17. Usuario en el borde de la celda.	42
Figura 18. Usuario dentro de la celda.	42
Figura 19. Usuario en la mitad de la celda.	43
Figura 20. Capacidad de Canal en el Borde de la Celda.	43
Figura 21. Capacidad de Canal en la Mitad de la Celda.	44



Figura 22. Capacidad de Canal Cerda de la Celda.	44
Figura 23. Capacidad de Canal Ergódica para multiusuario en esquemas SU y MU-MIMO con/sin precodificación lineal.	45
Figura 24. Capacidad de Canal de LTE con MIMO de arreglo 2x2.	46
Figura 25. Escenario 2 - Una Celda con Múltiples Usuarios.	47
Figura 26. Predicción de Cobertura por Transmisores.	48
Figura 27. Configuración de Mapas de Tráfico.	49
Figura 28. Mapa de Tráfico. Sitio Urbano - Mercado Oriental.	49
Figura 29. Mapa de Tráfico. Sitio Suburbano - Las Colinas.	50
Figura 30. Configuración de la fuente de Tráfico para Simulación Monte Carlo.	51
Figura 31. Simulaciones Monte Carlo. Zonas urbana y suburbana.	51
Figura 32. Mapa de despliegue de celdas usando el cellfile.	52
Figura 33. Predicción de Cobertura por Transmisores.	53
Figura 34. Mapa de Tráfico. Zona Urbana - Ruta de Drive Test.	54
Figura 35. . Simulación Monte Carlo. Zona urbana - Ruta de Drive Test.	55
Figura 36. Perfil del enlace de Sitio Urbano usando Point Analysis Tool.	56
Figura 37. Niveles de RSSI para sitio de Mercado Oriental en Drive Test.	56
Figura 38. Perfil del enlace de Sitio Suburbano usando Point Analysis Tool.	57
Figura 39. Niveles de RSSI para sitio de las Colinas en Drive Test.	57



## Lista de Tablas

Tabla	Página
Tabla 1. Programación de Drive Test Yota de Nicaragua.	27
Tabla 2. Restricciones del Modelo Okumura-Hata.	36
Tabla 3. Restricciones del Modelo Estándar.	37
Tabla 4. Parámetros usados en las simulaciones.	41
Tabla 5. Parámetros introducidos en MATLAB®.	41
Tabla 6. Parámetros considerados para evaluar los KPI.	58
Tabla 7. KPI evaluados para Escenario 3 y Drive Test con Yota.	58
Tabla 8. Comparación de RSSI - LTE 700 MHz vs Yota.	59



## Índice

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos .....	ii
Lista de Abreviaciones .....	iii
Abstract .....	vi
Resumen .....	vii
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tablas.....	x
Índice .....	xi
Introducción.....	1
Planteamiento del Problema .....	2
Objetivos.....	2
Justificación.....	3
1. Marco Referencial .....	4
1.1 Evolución de las comunicaciones móviles.....	5
1.1.1 Sistemas móviles pre-celulares.....	5
1.1.2 Sistemas móviles celulares .....	6
1.2 Sistema LTE.....	14
1.2.1 Metas de diseño para LTE.....	15
1.2.2 Acceso múltiple multi-portadora .....	16
1.2.3 Arquitectura del sistema .....	17
2. Metodología.....	20
2.1. MATLAB® .....	21
2.2 ATOLL® .....	21
2.3 Descripción de los escenarios.....	22
2.4 Localización de sitios.....	23
2.4.1 YOTA de Nicaragua.....	26
3. Mediciones, Simulaciones y Análisis de Resultados .....	29
3.1 LTE.....	30
3.1.1 E-UTRAN vs Predecesores .....	31



3.1.2 Tasa de Datos Alta .....	32
3.2 Simulación de los escenarios.....	34
3.2.1 Aspectos a considerar .....	34
3.2.2 Escenario 1 .....	41
3.2.3 Escenario 2 .....	47
3.2.4 Escenario 3 .....	52
3.3 Resultados de Drive Test.....	55
3.4 Comparación entre Mediciones y Simulaciones. ....	55
3.5 Discusión de Resultados.....	59
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	60
4.1 Conclusiones.....	61
4.2 Recomendaciones.....	62
5. Bibliografía .....	63
Anexos .....	65
Anexo A. M-File para generación de una celda celular y un usuario aleatorio.....	A
Anexo B. M-File para simular el efecto de MIMO en la capacidad de canal en LTE. ....	B
Anexo C. Gráficas de los resultados del Drive Test con Yota mostrando los niveles de:.....	C
1. Relative Signal Strength Indicator.....	C-1
2. Download Throughput. ....	C-3
Anexo D. Acuerdo Administrativo 007-2005 de Telcor para la parte alta y baja de la banda de 700 MHz.....	D



## Introducción

Las comunicaciones móviles hoy en día son parte fundamental de nuestro entorno social. El continuo crecimiento de su desarrollo ha generado la necesidad de buscar y obtener mayores coberturas y al mismo tiempo mejores calidades de servicio (QoS por sus siglas en inglés), para poder así generar diversos servicios a nivel global, es decir, desde cualquier sitio y en cualquier momento.

Dentro del contexto del desarrollo y evolución de las tecnologías de comunicación móvil, muchas veces se discute en términos de la evolución de estas tecnologías, es decir si tenemos o no cobertura 2G, 3G o más recientemente 4G. Estos términos hacen referencia a la generación de la red móvil sobre la que nos estamos conectando y sus diferencias evolutivas van enfocadas a la transmisión de datos de mayor tamaño y a altas velocidades.

Estos factores han llevado al diseño de la red 4G. Para lograr este objetivo, la utilización de la tecnología Long Term Evolution (LTE), desarrollada por el proyecto de colaboración 3rd Generation Partnership Project (3GPP), es interesante ya que este nuevo paradigma de red incluye mecanismos de gestión de Calidad de Servicio (QoS) ya que provee mejoras en la cobertura de red y la calidad de la señal.

Este proyecto monográfico se enfoca en dos aspectos principales. Primero, en tomar mediciones de campo de las tecnologías de telefonía y datos móviles existentes en Nicaragua tomando como referencia las áreas donde se presenta la mayor demanda de servicios de comunicaciones móviles en términos de tráfico (Managua).

Segundo, utilizar estos datos de las mediciones para ingresarlos en un m-file basado en la herramienta MATLAB®. Los resultados de esta simulación serán verificados con la herramienta de diseño ATOLL® la cual permitirá visualizar de forma geo-referenciada el cálculo en MATLAB®. El propósito es presentar tres escenarios que permitan explorar el desempeño de una red LTE implementada en la zona de mayor demanda de tráfico por los usuarios de telefonía móvil en Nicaragua.

En el primer capítulo del documento, contiene el Marco Referencial describe conceptos relevantes para crear un background de la línea evolutiva de la telefonía móvil celular.

El segundo capítulo, Metodología, es donde se explora a fondo la aproximación adoptada para resolver el problema planteado. Aquí se incluye una descripción del uso del software a utilizar, en este caso, MATLAB® y ATOLL®, para el planteamiento de escenarios.



El tercer capítulo, Mediciones, Simulaciones y Análisis de Resultados, detalla los datos obtenidos de las mediciones de campo realizadas en el casco urbano de Managua, en Worldwide Interoperability for Microwave Access, (WiMAX) 802.16e. y los pasos utilizados para simular los escenarios propuestos. Finalmente, se realiza el análisis de los resultados obtenidos.

El cuarto capítulo, Conclusiones y Recomendaciones, relata cómo se logró acometer los objetivos establecidos y se proponen recomendaciones para futuros trabajos de investigación relacionados a este tema.

## **Planteamiento del Problema**

Uno de los mayores problemas que encontramos hoy en día, es la disponibilidad de ancho de banda para los usuarios de telefonía móvil. A como se discutió en la teoría del Marco Referencial, esa ha sido la directriz a seguir para la evolución a redes de cuarta generación, 4G.

La velocidad y disponibilidad de recursos para la gran demanda que existe es una de las mayores dificultades que los operadores de telefonía celular deben enfrentar para brindar un servicio de calidad a los usuarios.

En este sentido se llevará a cabo un estudio de propagación para entender lo que sería el desempeño del estándar LTE para nuestro país Nicaragua. Por medio del software MATLAB® y ATOLL®, se realizarán cálculos y proyecciones, basados en mediciones de campo a través de drive test, que permitan simular un despliegue de red LTE y de pautas para contestar la pregunta planteada en este proyecto monográfico:

- ***¿Qué características tecnológicas posee LTE que permiten mejorar el servicio actual de voz y datos en Nicaragua?***

## **Objetivos**

Basados en el problema propuesto, se han establecido los siguientes objetivos.

### ***Objetivo General***

***"Realizar un estudio experimental por simulación del diseño de una red LTE de telefonía y datos móviles en Nicaragua."***

### ***Objetivos Específicos***

***"Analizar los parámetros del estándar LTE establecidos por la organización 3GPP."***



*"Utilizar el software MATLAB® para la realización de simulaciones con los parámetros de la red LTE."*

*"Determinar, por medio de simulaciones, el desempeño de una red LTE y compararlo con el de una red WiMAX 802.16e en operación bajo las condiciones encontradas en Nicaragua."*

*"Discutir si la tecnología de LTE es una solución para la demanda de servicios de voz y datos que deben satisfacer los carriers actualmente en Nicaragua."*

## **Justificación**

El problema propuesto está intrínsecamente relacionado con la realidad que se presentará en Nicaragua en el corto plazo, debido a que los operadores celulares actuales, Movistar y Claro, y de datos inalámbricos, Yota, podrían no estar en capacidad de brindar un servicio de calidad debido a la gran demanda de acceso al ancho de banda por parte de los usuarios.

La intención es encontrar las tecnologías nuevas que propone LTE con el fin de determinar un nuevo esquema de QoS el cual permita contrarrestar los problemas de acceso al ancho de banda. Entre estos parámetros, estableceremos la factibilidad técnica de LTE y cómo esta debería disponerse para un desempeño óptimo en Nicaragua.

El presente proyecto también sigue la línea propuesta por algunos trabajos monográficos desarrollados en nuestra alma mater que se relacionan con el estudio de tecnologías emergentes en Telecomunicaciones, las cuales representan mejoras en los sistemas inalámbricos. A continuación se enumeran algunos de estos proyectos:

- "Estudio Técnico y Económico para la Implementación de la Tecnología WIMAX en el Campus Universitario de la UNI". Autor: Lester Abdul Olivares Mena. Tutor: Ing. Carlos Rivas Mena (2008)
- "Estudio Técnico y de Funcionalidad de las Tecnologías Móviles 3G de Mayor Despliegue Global para su Utilización en los Procesos de Enseñanza-Aprendizaje de la Disciplina de Sistemas de Comunicación de la Carrera de Electrónica". Autor: Br. Marvin Alberto Martínez Torres. Tutor: Ing. Enrique Hernández García (2009).
- Estudio y Simulación Básica de los Sistemas de Comunicaciones Tipo MIMO Usando MATLAB®. Autores: Ivania Zelaya Urbina y Gelman Cerda Urbina. Tutor: Dr. Marvin Arias Olivas. (2012).



## **Capítulo 1**

### **1. Marco Referencial**

El Marco Referencial comienza con una breve reseña de la línea evolutiva de las redes de telefonía celular desde 1G (1st Generation) hasta 4G (4th Generation).

Finaliza con la definición de conceptos relacionados con LTE incluyendo las metas de rendimiento, el acceso a múltiples portadoras y las innovaciones que provee el SAE.



## 1.1 Evolución de las comunicaciones móviles

Hoy en día la tecnología más utilizada es la telefonía móvil, incluso, por encima del Internet, telefonía fija y otras tecnologías; estimándose que alrededor del 87% de la población mundial es usuario de telefonía móvil. El rápido avance tecnológico ha permitido crear dispositivos móviles cada vez más sofisticados y capaces de proporcionar una amplia gama de aplicaciones, con lo cual la aceptación y penetración de la telefonía móvil a nivel mundial es más que evidente, convirtiéndose el teléfono celular en un dispositivo indispensable en la vida cotidiana del mundo actual. [1]

### 1.1.1 Sistemas móviles pre-celulares

El 28 de julio de 1945 el comisario J.K. Jett de la Federal Communications Commission (FCC) de Estados Unidos publicó en el Saturday Evening Post un artículo titulado "Phone me by Air" en el que hacía referencia, por primera vez en la historia, de un sistema radio celular para establecer comunicaciones bidireccionales vía radio en la banda de 460 MHz. Si bien el artículo no explicaba el método en el que se podría lograr la comunicación entre el móvil y la red telefónica fija, sí hacía referencia al reuso de frecuencia en áreas pequeñas, mencionando la posibilidad de que millones de usuarios en todo el país pudieran utilizar los mismos canales simultáneamente y sin interferencias de por medio. A pesar de que la FCC en su momento no concedió el espectro para llevar a cabo el servicio, se continuó el estudio de los sistemas celulares llegando a ser implementados posteriormente, con el mecanismo de reuso de frecuencia como elemento sumamente importante. [1]

La FCC aprobó, en 1946, el primer servicio de telefonía comercial en vehículo, operado por *American Telephone & Telegraph* (AT&T). En 1947, AT&T también introdujo el concepto celular de reutilización de frecuencias de radio, que se convirtió en fundamental para todos los subsiguientes sistemas de comunicación móvil. Sistemas similares fueron operados por varias administraciones y los operadores de telefonía monopolio sobre líneas de cables durante las décadas de 1950 y 1960, utilizando un equipo voluminoso y hambrientos de consumo de potencia y la disponibilidad transmitidas por auto-servicios para un número muy limitado de usuarios. [2]

La gran absorción de suscriptores y el uso de la comunicación móvil llegaron cuando se convirtió en una preocupación internacional en relación con varias partes interesadas, al principio sobre todo los operadores. Los primeros sistemas de comunicaciones móviles internacionales se iniciaron en la década de 1980, los más conocidos son Nordic Mobile Telephone (NMT) que se puso en marcha en los países nórdicos. Advanced Mobile Phone System (AMPS), Total Access Communication System (TACS) en Europa, y Japanese TACS (JTACS) en Japón. El equipo era todavía abultado, principalmente transmitidas por coche, y la calidad de voz es a menudo



inconsistente, con "cross-talk" entre los usuarios que son un problema común. Con NMT surgió el concepto de "roaming", dando un servicio también para los usuarios que viajan fuera del área de su "casa" del operador. Esto también le dio un mayor mercado para los teléfonos móviles, que atrae a más compañías en el negocio móvil de comunicación. [2]

Generalizando, se puede decir que los primeros sistemas de telefonía móvil se distinguen por tener pocas estaciones base transmitiendo a alta potencia para poder cubrir áreas extensas; presentaban poca capacidad de usuarios, elevados costos y equipos terminales muy pesados, voluminosos y demandaban un gran consumo de potencia que por lo general se utilizaban en vehículos. Hasta este momento, el término de comunicaciones "móviles" no era el que mejor describía a estos sistemas pero sentó las bases para el desarrollo de la telefonía móvil a como la conocemos.

### 1.1.2 Sistemas móviles celulares

Para el buen entendimiento de las comunicaciones móviles celulares actuales es importante estudiar la evolución que éstas han tenido desde lo que se conoce como primera generación (1G), hasta llegar a la cuarta generación (4G) la cual es el paso a seguir en la actualidad, repasando también la segunda y tercera generación (2G y 3G) que es la que satisface la mayor parte de la demanda actual en telefonía inalámbrica.



Figura 1. Generaciones de sistemas de comunicaciones móviles.

El concepto "celular" se origina en 1947 en los laboratorios Bell gracias a la labor de D.H. Ring con la ayuda de W.R. Young, quienes diseñaron sistema celular definiendo la división de un territorio extenso en pequeñas áreas con geometría hexagonal denominadas celdas, en cada una de las cuales se encuentra un transmisor de baja potencia. Consideraron el concepto de reuso de frecuencia entre distintas celdas lo suficientemente alejadas entre sí y el mecanismo de handover-handoff automático que permitiera la continuidad de la comunicación al desplazarse de celda en celda. Para entonces no existía la tecnología que permitiría implementar el sistema celular y no había disponibilidad del espectro electromagnético necesario, por lo que pasaron treinta años antes de poderse implementar las ideas propuestas. [1] A continuación se describe brevemente la evolución de las tecnologías de comunicación móvil que son comúnmente clasificadas en generaciones de telefonía móvil del 1G al 4G.



### *Sistemas móviles de primera generación (1G)*

El sistema celular analógico de la primera generación era compatible con "servicios de telefonía simples viejos" (POTS por sus siglas en inglés), es decir, la voz con algunos servicios complementarios relacionados. Con el advenimiento de la comunicación digital durante la década de 1980, la oportunidad de desarrollar una segunda generación de estándares de comunicación móvil y sistemas basados en la tecnología digital y con ello tener la oportunidad de aumentar la capacidad de los sistemas, para dar una calidad más consistente del servicio, y para desarrollar dispositivos mucho más atractivos y móvil verdaderamente. [2]

Los sistemas móviles de primera generación fueron los primeros en poner en práctica el concepto celular, caracterizándose por ser analógicos y ofrecer únicamente servicios de voz. Estos sistemas 1G, como se les denomina, no pusieron en práctica el mecanismo de control de potencia, por lo que todos los terminales transmitían a la misma potencia sin importar su ubicación o condiciones del entorno y como consecuencia el consumo de batería y las interferencias ocasionadas eran elevados. Limitados por la tecnología del momento, los equipos seguían siendo voluminosos y pesados, por lo que en su mayoría seguían siendo implementados en los vehículos. [1]

El primer sistema celular comercial 1G fue introducido por la Nippon Telegraph and Telephone (NTT) en 1979, en Japón. Posteriormente, en 1981 nace el primer sistema de 1G multinacional, el NMT, que se desplegó en Dinamarca, Noruega, Suecia y Finlandia utilizando la banda de 450 MHz. En Estados Unidos, después de haber presentado retrasos por motivos regulatorios, fue introducido en 1983 el sistema AMPS tras la realización de pruebas exitosas en la ciudad de Chicago desde el año 1978. En 1985 fue implementado el sistema TACS en el Reino Unido con grandes similitudes al sistema AMPS. Posteriormente nacieron los sistemas Radio Telephone Network C (C-Netz) en Alemania occidental, Radiocom 2000 en Francia y Radio Telefono Mobile Integrato (RTMI) en Italia. [1]

Los sistemas 1G tuvieron rápida aceptación en sus países de origen y fueron siendo adoptados por otros países. Varios aspectos eran comunes para los sistemas 1G. Todos utilizaban la técnica de duplexado de frecuencia (FDD) definiendo bandas distintas para el enlace ascendente y el descendente, que generalmente se situaban en torno a los 900 MHz. Empleaban la modulación analógica de frecuencia (FM) para la voz, dividían el espectro disponible en canales que repartían a las estaciones base, de manera que para evitar interferencias se asignaban canales distintos a las estaciones bases vecinas, y por cada llamada se asignaba un canal dedicado para cada enlace por todo el tiempo de duración de la misma. Sin embargo, a pesar de que los sistemas 1G se basaban en los mismos principios de funcionamiento, ninguno de ellos era



compatible entre sí, por lo que un teléfono móvil 1G no podía ser utilizado en otros países que no operaran su mismo sistema. [1]

### *Sistemas móviles de segunda generación (2G)*

En Europa, el Groupe Spécial Mobile originalmente, para ser más tarde Global System for Mobile communications (GSM) para desarrollar un sistema europeo de telefonía móvil del sistema se inició a mediados de 1980 por las administraciones de telecomunicaciones en European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT) y continuó más tarde en el nuevo European Telecommunication Standards Institute (ETSI). La norma GSM se basa en el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), como lo fueron la norma US-TDMA y el estándar japonés Personal Digital Cellular (PDC) que se introdujeron en el mismo marco de tiempo. Un poco más tarde el desarrollo de un Código de Acceso Múltiple por División (CDMA) estándar llamado Interim Standard 95 (IS-95) se completó en los Estados Unidos en 1993. Todas estas normas eran "de banda estrecha" en el sentido de que "blanco" bajo ancho de banda, tales como servicios de voz. Con la segunda generación de comunicaciones móviles digitales vino también la oportunidad de ofrecer servicios de datos en las redes móviles de comunicación. Los servicios de datos primarios fueron introducidas en 2G mensajería de texto (Servicio de mensajes cortos, SMS) y el circuito de conmutación de servicios de datos que permiten el correo electrónico y otras aplicaciones de datos, inicialmente a un pico modesta velocidad de datos de 9,6 Kbps. Mayores velocidades de datos y posteriormente se introdujo en los sistemas 2G evolucionado mediante la asignación de múltiples ranuras de tiempo a un usuario y a través de los esquemas de codificación modificada. Paquete de datos sobre los sistemas celulares se convirtió en una realidad en la segunda mitad de la década de 1990, con servicios generales de radio por paquetes (GPRS) introducidas en las redes GSM y paquetes de datos también se agrega a otras tecnologías celulares como el estándar japonés PDC. Estas tecnologías se refieren a menudo como 2.5G. El éxito del servicio inalámbrico de datos iMode en Japón, que comprendió la realización de "ecosistema" para la prestación del servicio, carga, etc., le dio una indicación muy clara de las posibilidades de las aplicaciones a través de paquetes de datos en los sistemas de telefonía móvil, a pesar de los datos bastante bajas velocidades admitidas en el momento. [2]

La característica más relevante de los sistemas 2G con respecto a los de 1G es que pasaron de ser analógicos a digitales, lo que implica una serie de ventajas como lo es una mayor calidad frente a interferencias y mejor utilización del espectro. Además, gracias a los avances en las tecnologías digitales se logró reducir el volumen de los equipos terminales, logrando una miniaturización del mismo, así como la reducción del costo y del consumo de potencia, permitiendo que las comunicaciones móviles pasaran



a extenderse a toda la población con interés en comunicarse en cualquier momento y desde cualquier lugar. Por otro lado, las técnicas de procesado digital de la información como la modulación digital, codificación de canal, codificación de fuente, sistemas entrelazados, cifrado de las comunicaciones, entre otras, permitieron mejoras en cuanto a calidad, velocidad de transmisión, capacidad del sistema y la posibilidad de agregar nuevos servicios como el buzón de voz, identificador de llamadas y mensajes de texto. [1]

El sistema GSM utiliza la técnica de duplexado FDD en la banda de 900 MHz, operando inicialmente a frecuencias de 890-915 MHz en el enlace ascendente y 935-960 MHz en el enlace descendente. Como técnica de acceso emplea una combinación de frecuencia y tiempo, es decir, utiliza Frequency Division Multiple Access (FDMA) para dividir el espectro total de 25 MHz en 124 portadoras de 200 KHz y a su vez cada canal de 200 KHz lo divide en 8 ranuras de tiempo empleando Time Division Multiple Access (TDMA). A pesar de que el sistema GSM fue creado para operar en la banda de 900 MHz, posteriormente surgieron variaciones del sistema, de las cuales las más importantes son DCS-1800 y PCS-1900, también conocidas como GSM-1800 y GSM-1900 respectivamente, que fueron adoptadas por algunos países dentro y fuera de Europa. [1]

El éxito del sistema GSM rápidamente se extendió por países de todo el mundo, y con la aparición de los teléfonos celulares de tres bandas, que operan en las frecuencias 900, 1800 y 1900 MHz, se hacía cada vez más fácil el empleo del roaming internacional permitiendo establecer comunicaciones en cualquiera de los cinco continentes. Cabe destacar que a pesar de que GSM es sin duda el sistema de segunda generación con mayor extensión en el mundo, existen también otros sistemas tales como Interim Standard 54 (IS-54), que posteriormente evolucionó a Interim Standard (IS-136), e IS-95 desarrollados en Estados Unidos o el sistema PDC, originalmente conocido como Japan Digital Cellular (JDC), desarrollado en Japón. [1]

Con el advenimiento de la 3G y la interfaz de radio de mayor ancho de banda de Acceso universal de radio terrestre (UTRA) llegó la posibilidad de implementar una gama de nuevos servicios que se había insinuado sólo en con 2G y 2.5G. El desarrollo de la radio 3G de acceso que hoy se manejan en el 3GPP. Sin embargo, los pasos iniciales para 3G fueron tomadas en la década de 1990, mucho antes de 3GPP se formó. Lo que también sentó las bases para la 3G fue la internacionalización de las normas celulares. GSM es un proyecto paneuropeo, pero pronto atrajo el interés mundial cuando el estándar GSM se implementó en varios países fuera de Europa. A gana estándar mundial en la economía de escala, ya que el mercado de los productos se hace más grande. Esto ha llevado a una cooperación mucho más estrecha



internacional en torno a las tecnologías celulares 3G que para las generaciones anteriores. [2]

### *Sistemas móviles de tercera generación (3G)*

El trabajo en una comunicación móvil de tercera generación se inició en la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en la década de 1980, primero bajo los sistemas futuros distintivo público de telecomunicaciones móviles terrestres, más tarde cambiado a las International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000). [1]

El Congreso Administrativa de Radio Mundial CAMR-92 identificó 230 MHz de espectro para las IMT-2000 en todo el mundo. De estos 230 MHz, 2 X 60 MHz se identificó como espectro apareado para FDD y 35 MHz como espectro no apareado para Time-Division Duplex (TDD), tanto para uso terrestre. Algunos espectros se establecieron exclusivamente para servicios por satélite. Con eso, el escenario estaba listo para especificar las IMT-2000. En paralelo con el despliegue y evolución de sistemas de comunicación 2G móvil durante la década de 1990, importantes esfuerzos se pusieron en las actividades de investigación en todo el mundo 3G. En Europa, algunos proyectos parcialmente financiados por la Unión Europea como resultado un concepto de acceso múltiple que incluía un componente Wideband CDMA (WCDMA) que se introdujo al ETSI en 1996. En Japón, la Asociación de Industrias y Empresas de Radiocomunicaciones (ARIB) era, al mismo tiempo que define una tecnología de comunicación inalámbrica 3G basadas en CDMA de banda ancha, así como en los Estados Unidos un WCDMA cuyo concepto fue llamado WIMS, se desarrolló en el comité T1.P12. Corea del Sur también comenzó a trabajar en CDMA de banda ancha en este momento. Cuando las actividades de estandarización de 3G se iniciaron en ETSI en 1996, hubo conceptos WCDMA propuestas tanto de un proyecto europeo de investigación y de la normalización ARIB en Japón. Las propuestas de banda ancha CDMA de Europa y Japón se fusionaron y salieron como parte del concepto ganador a principios de 1998 en el trabajo europeo sobre servicios universales de telecomunicaciones móviles (UMTS), que era el nombre europeo para 3G. Normalización de WCDMA continuó de forma paralela en varios grupos de normas hasta el final de 1998, cuando 3GPP fue formado por organizaciones de desarrollo de estándares de todas las regiones del mundo.

Esto resolvió el problema de tratar de mantener un desarrollo paralelo de las especificaciones alineadas en múltiples regiones. Los socios actuales de organización del 3GPP están ARIB en Japón, China Communications Standards Association (CCSA) en China, ETSI en Europa, Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS), anteriormente T1.P12, en Estados Unidos, Telecommunications Technology Association (TTA) en Corea del Sur, y Telecommunication Technology Committee (TTC) en Japón. En este momento, cuando los organismos de normalización están



dispuestos a poner los detalles en las especificaciones 3GPP, el trabajo en los sistemas móviles 3G ya habían estado en curso desde hace tiempo en el ámbito internacional en el UIT-R. Ese trabajo fue influenciado por y proporciona también un marco internacional más amplio para el trabajo de estandarización en el 3GPP. [2]

Las mejoras más importantes de las características del acceso radio UMTS se describen en la Release 5 con la adición de High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) y en la Release 6 con High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) que juntas se conocen como High Speed Packet Access (HSPA). HSPA mejora los servicios de paquetes de datos introduciendo mayores velocidades y menores retardos, manteniendo al mismo tiempo una buena cobertura y una gran capacidad en el sistema. Para lograr esto, HSPA introduce nuevos esquemas de modulación de mayor nivel, control de potencia rápido, fast scheduling y mecanismos de retransmisión híbrida (HARQ) con redundancia incremental. De esta manera se logran velocidades de hasta 14.4 Mbps en HSDPA y 5.7 Mbps en HSUPA. El sistema de tercera generación CDMA2000 fue desarrollado por la 3GPP2 como evolución del sistema IS-95 siendo compatible con el mismo. En CDMA2000 se incorporaron básicamente las mismas tecnologías que en WCDMA/HSPA para lograr mejores tasas en la transmisión de datos y mejorar el rendimiento de la red. La evolución de CDMA2000 ocurrió en distintas fases, primero surgió CDMA2000 1xRTT y luego dos ramas paralelas se iniciaron EV-DO (Evolution-Data Only) y EV-DV (Evolution for integrated Data and Voice) otorgando velocidades de transmisión superiores a 2 Mbps. [1]

Otra actividad importante en el UIT-R sobre las IMT-Advanced ha sido la de identificar el espectro disponible a nivel mundial, conveniente para los sistemas IMT. La obra ha supuesto espectro estudios de compartición entre las tecnologías IMT y de otro tipo en esas bandas. Disponibilidad de espectro adecuado y espectro armonizado a nivel mundial son identificados como esenciales para las IMT-Avanzadas. [2]

El espectro para 3G fue identificado por primera vez en el Congreso Administrativo Mundial de Radiocomunicaciones CAMR-92, 230 MHz donde fue identificado como destinados a ser utilizados por las administraciones nacionales que deseen implementar las IMT-2000. El denominado IMT-2000 "banda base" en 2 GHz es en este rango de frecuencia y fue la primera banda, donde los sistemas de 3G se desplegaron. Un espectro adicional se identificó para las IMT-2000 en posteriores conferencias mundiales de comunicaciones de radio.

La CMR-2000 identificó las bandas 2G existentes a 800/900 MHz y 1800/1900 MHz, más una 190 MHz adicionales de espectro en 2,6 GHz, todos para las IMT-2000. Como un espectro adicional para las IMT-2000, WRC'07 ha identificado una banda de



450 MHz, el llamado "dividendo digital" en 698-806 MHz, más un adicional de 300 MHz de espectro en frecuencias más altas. La aplicación de estas nuevas bandas varía a nivel regional y nacional. Las disposiciones de frecuencias en todo el mundo para las IMT-2000 se describen en la Recomendación UIT-R M.1036, que actualmente está siendo actualizado con los arreglos para las bandas de frecuencia más recientes añadidas a WRC'07. La recomendación se describen las variaciones regionales en cómo las bandas se aplican y también identifica qué partes del espectro están emparejados y que son no apareado. Para el espectro apareado, las bandas de enlace ascendente (transmisión desde el móvil) y enlace descendente (estación base de transmisión) se identifican para FDD la operación. Las bandas no pareadas pueden, por ejemplo, ser utilizado para TDD operación. Tenga en cuenta que la banda que está más global desplegado para 3G es todavía 2 GHz. [2]

### *Sistemas móviles de cuarta generación (4G)*

La evolución de los sistemas 3G a 4G está impulsada por la creación y el desarrollo de nuevos servicios para dispositivos móviles, y está habilitada por el *avance* de la tecnología disponible para sistemas móviles. También se ha producido una evolución del entorno en el que se despliegan los sistemas móviles y operación, en términos de competencia entre los operadores móviles, los desafíos de otras tecnologías móviles y nueva regulación del uso del espectro y los aspectos de mercado de los sistemas móviles. [2]

Tal y como se observa en la Figura 2, existen tres organizaciones que se han encargado de desarrollar estándares de comunicaciones móviles con el fin de cumplir los requisitos del IMT-Advanced. La 3GPP empezó a finales de 2004 la primera especificación del sistema Long Term Evolution (LTE) que fue concluida a finales de 2008 y ha evolucionado posteriormente a LTE-Advanced. Por otro lado, la IEEE ha creado la familia 802.16 conocida como Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) donde la versión 802.16m, también conocida como WirelessMAN-Advanced, ha sido aprobada por la ITU-R como una tecnología IMT-Advanced. Por último, la 3GPP2 comenzó el desarrollo del sistema Ultra Mobile Broadband (UMB) como evolución del sistema CDMA2000 con las intenciones de convertirse en un sistema de 4G pero el proyecto fue dejado inconcluso para pasar a apoyar a LTE. [1]

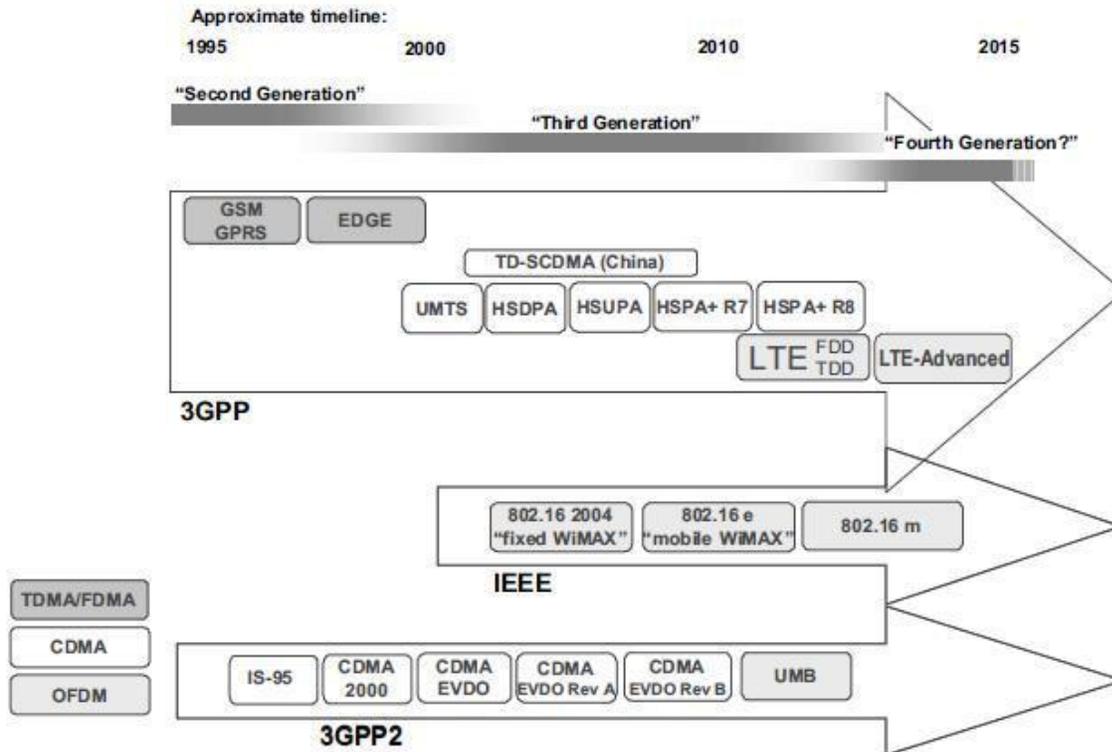


Figura 2. Estándares de comunicaciones móviles.

Fuente: extraído de [1].

Después de una evaluación acerca de estrictos criterios técnicos y operativos, la ITU determinó que "LTE-Advanced" y "WirelessMAN-Advanced" deben recibir la designación oficial de IMT-Advanced. Siendo las tecnologías más avanzadas actualmente en comunicaciones de banda ancha móvil, IMT-Advanced es considerada como "4G", aunque se reconoce que este término, mientras no estuvo definido, también puede ser aplicado a los precursores de estas tecnologías, LTE y WiMAX, y a otras tecnologías que evolucionaron de sistemas 3G proporcionando un importante nivel de mejora en el rendimiento y en las capacidades con respecto a los sistemas iniciales de 3G desplegados. [1]

La ITU-R define 4G como tecnologías basadas totalmente en IP y conmutación de paquetes así como tener compatibilidad con otros servicios dentro de redes IMT, interoperabilidad con tecnologías previas, servicios de alta calidad, UE utilizables mundialmente, roaming mundial y picos de datos de avanzada hasta 1 Gbps. En la figura 3 se muestra una gráfica, basado en la ITU-R, donde se presenta la evolución a 4G.

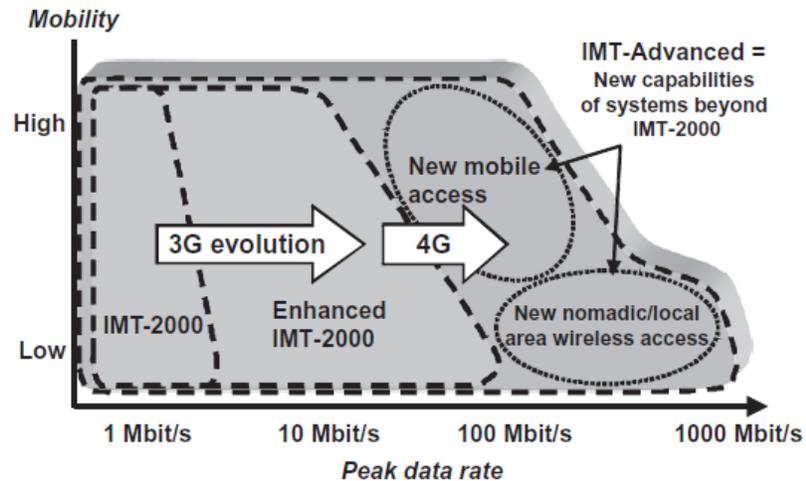


Figura 3. Ilustración de las capacidades de IMT-2000 e IMT-Advanced, basado en la línea de trabajo descrita en la recomendación ITU -R M.1645.

Fuente: extraído de [2].

Hasta este punto se han explorado las características más importantes de cada una de las generaciones de comunicaciones móviles. En esta etapa del capítulo abarcaremos la tecnología en donde se centrarán esfuerzos por estudiar LTE.

## 1.2 Sistema LTE

El sistema LTE fue diseñado por la 3GPP con la idea de incrementar en gran medida las capacidades que ofrecían los sistemas de comunicaciones móviles anteriores. En este sentido, LTE es el primer sistema en ofrecer todos los servicios, incluida la voz, sobre el protocolo IP dejando atrás la conmutación de circuitos para pasar a un nuevo sistema basado completamente en conmutación de paquetes. Además, las velocidades pico de la interfaz radio que introduce LTE superan ampliamente a aquellas conseguidas en los sistemas anteriores, soportando velocidades de al menos 100 Mbps en el downlink (DL) y 50 Mbps en el uplink (UL), que permite a los usuarios la posibilidad de movilizarse a grandes velocidades y al mismo tiempo disfrutar de los servicios multimedia. [1]

La telefonía fija (POTS) y las generaciones anteriores de la tecnología móvil se construyeron para servicios de conmutación de circuitos, principalmente de voz. Los servicios de datos GSM primero fueron conmutación de circuitos, basada en paquetes GPRS que se integraron posteriormente. Esto también influyó en el primer desarrollo de la 3G, que se basó en datos conmutados por circuito, con servicios de conmutación de paquetes como un add-on. No fue sino hasta la evolución de 3G en HSPA y más tarde LTE/LTE-Advanced que los servicios de conmutación de paquetes basado en



Internet Protocol (IP) se hicieron el objetivo principal de diseño. Los viejos sistemas de conmutación de circuitos se mantienen, pero en LTE el servicio es proporcionado a través de IP, como por ejemplo la inserción de voz sobre IP (VoIP) y creando su propio estándar Voice Over LTE (VoLTE). [2]

IP es en sí mismo un servicio agnóstico, y permite así una gama de servicios con diferentes requisitos. Los principales relacionados con el servicio parámetros de diseño de una interfaz de radio soporta una variedad de servicios son:

- **Velocidad de datos.** Muchos de los servicios con velocidades bajas de datos, tales como servicios de voz son importantes y todavía ocupan una gran parte de la capacidad global de una red de telefonía móvil, pero son los servicios de datos de mayor velocidad que impulsan el diseño de la interfaz de radio. La creciente demanda de mayores velocidades de datos para la navegación web, descarga y transferencia de archivos empuja las velocidades de datos máximas para los sistemas móviles de Kbps para 2G, a Mbps para 3G y acercarse a Gbps de 4G.
- **Delay.** Los servicios interactivos tales como juegos en tiempo real, sino también la navegación web y la transferencia de archivos interactivos, tienen requisitos de retardo muy bajo, por lo que es un objetivo principal de diseño. Hay, sin embargo, muchas aplicaciones, tales como el correo electrónico y televisión, donde los requisitos de retardo no son tan estrictas. El retardo para un paquete enviado desde un servidor a un cliente y viceversa se denomina latencia.
- **Capacidad.** Desde el punto de vista del operador del sistema móvil, no es sólo de importancia las tasas máximas de datos proporcionados al usuario final, sino también la velocidad de datos total que puede ser proporcionado en promedio desde cada sitio de estación base desplegado y considerando el ancho de banda disponible. Esta medida de la capacidad se denomina *eficiencia espectral*. En el caso de escasez de capacidad en un sistema móvil, la Calidad de Servicio (QoS) para el usuario final puede verse degradado. [2]

### 1.2.1 Metas de diseño para LTE

La capa física (Physical Layer, PHY) de LTE está diseñada para cumplir con las siguientes metas [5]:

1. Soporta anchos de banda escalables: 1.4, 3.0, 5.0, 10.0, 15.0 y 20.0 MHz
2. Tasa pico de datos que escala con sistemas de ancho de banda.
  - a. Downlink (2 Ch MIMO) picos de datos de hasta 100 Mbps en un canal de 20 MHz



- b. Uplink (single Ch Tx) picos de datos de hasta 50 Mbps en un canal de 20 MHz
3. Configuración de antenas permitida
  - a. Downlink: 1x1, 2x2, 4x4
  - b. Uplink: 1x1, 1x2, 1x4
4. Eficiencia de espectro
  - a. Downlink: 3 to 4 x HSDPA Rel. 6
  - b. Uplink: 2 to 3 x HSUPA Rel. 6
5. Latencia
  - a. C-plane: <50 – 100 msec para establecer U-plane (de idle a active)
  - b. U-plane: <10 msec del UE al servidor
6. Movilidad
  - a. Optimizado para bajas velocidades (<15 km/h)
  - b. Alto rendimiento a velocidades de hasta 120 km/h
  - c. Mantiene enlace hasta velocidades de 350 km/h
7. Cobertura
  - a. Rendimiento al máximo hasta 5 km
  - b. Ligera degradación entre los 5 km – 30 km
  - c. Operatividad hasta los 100 km no debería ser impedido por el estándar
8. Más de 200 usuarios por celda. Celda de 5 MHz

### **1.2.2 Acceso múltiple multi-portadora**

El sistema LTE se caracteriza por ofrecer una canalización flexible que permite alcanzar altas velocidades de transmisión y facilitar la migración gradual hacia LTE de bandas espectrales ocupadas por 2G y 3G, en bandas pareadas con FDD y no pareadas con TDD. En este sentido, las posibles canalizaciones son: 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz. [3]

En vista de que el ancho de banda de 20 MHz introduciría elevadas distorsiones debido a la interferencia intersimbólica (ISI) ocasionada por la propagación multi-trayecto, se adoptó la técnica de acceso múltiple Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) en el DL que permite dividir el espectro en múltiples portadoras de banda estrecha ortogonales entre sí con una separación fija de 15 KHz. OFDMA permite la implementaciones de baja complejidad mediante el uso de un eficiente procesamiento de la Transformada de Fourier Rápida (FFT). Para confirmar esto consideraremos una muestra de una señal de OFDMA en un tiempo discreto donde se asume una tasa de muestreo,  $f_s$ , como un múltiplo del espaciado entre sub-portadoras  $\Delta f$  – eso es,  $f_s = 1/T_s = N \cdot \Delta f$ . El parámetro  $N$  se debe escoger para cumplir con el teorema de muestreo. Para obtener los distintos anchos de banda mencionados se varía el número de subportadoras, manteniendo la separación entre ellas constante. Incluso utilizando OFDMA queda presente cierta interferencia, por lo tanto se emplea

un prefijo cíclico que permite eliminar la Inter-Symbol Interference (ISI) ofreciendo de esta manera una gran eficiencia espectral. [1,2]

Gracias al scheduler empleado en OFDMA se pueden asignar las portadoras eficientemente a los usuarios dependiendo de las condiciones del canal y los requisitos de los servicios de cada uno de ellos, concediendo más o menos portadoras a cada usuario según el caso y ofreciendo diversidad frecuencial al asignar portadoras no contiguas a un mismo usuario. Por otro lado, la implementación de esta técnica se hace sencilla en el dominio digital gracias a la implementación de los procesos de Fast Fourier Transform (FFT) e Inverse FFT (IFFT). [1]

Es importante entender que las implementaciones basadas en Inverse Discrete Fourier Transform e IFFT (IDFT/IFFT) de un modulador OFDM, y aún más el tamaño de la IDFT/IFFT exacta, son solo opciones para implementación de transmisores. [2]

En el UL se adoptó una variante de OFDMA llamada Single Carrier- FDMA (SC-FDMA) que presenta una significativa reducción de la relación entre la potencia instantánea transmitida y la potencia media, denominado Peak-to-Average Power Ratio (PAPR), evitando complejidades en el amplificador de frecuencia de los terminales móviles y aumentando la batería de los mismos. [1]

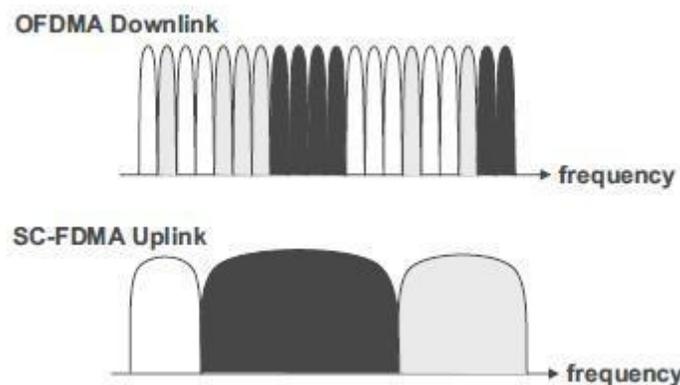


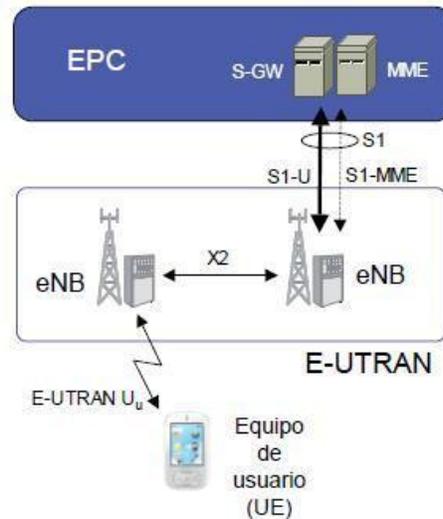
Figura 4. Dominio en frecuencia de las tecnologías de acceso múltiple de LTE.

Fuente: extraído de [1].

### 1.2.3 Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema LTE se diseñó en base a tres requisitos fundamentales: conmutación de paquetes únicamente, baja latencia y costos reducidos. Para lograr los objetivos, se planteó una arquitectura plana sin ningún nivel de jerarquización con la menor cantidad de nodos e interfaces posibles. La arquitectura de LTE comprende una nueva red de acceso denominada Evolved- UMTS Terrestrial

Radio Access Network (E-UTRAN) y una nueva red troncal denominada Evolved Packet Core (EPC), la combinación de la red de acceso y la red troncal recibe el nombre de Evolved Packet System (EPS), también llamada bajo el término LTE. [1]



Fuente: extraído de [1].

Figura 5. Arquitectura de red LTE.

Dados los requerimientos para reducir la latencia y los costos, hace sentido considerar una arquitectura de sistema que contenga menos nodos, esto se debe a que reduce la cantidad total de procesamiento relacionado al protocolo, el número de interfaces y el costo de prueba de interoperabilidad. Menos nodos también pueden resultar en un más rápido inicio de sesión o proceso de inicialización.

Los conceptos de LTE acerca de una arquitectura de sistema simplificada están estrechamente relacionados con el trabajo del grupo 3GPP sobre System Architecture Evolution (SAE), la cual define, como se observa en la figura 6, la base de la arquitectura para el sistema evolucionado definiendo los nuevos elementos del EPC e introduce dos nuevas entidades comúnmente referidas como Access Gateway (aGW) [4]:

- Mobility Management Entity (MME): maneja y guarda el estado de los UE (e.g. idle, Mobility o parámetros de seguridad).
- User Plane Entity (UPE): se encarga de manejar la transición de estados (e.g. de idle a activo).

También se introducen dos entidades más que son:

- 3GPP Anchor: Se encarga de administrar la movilidad entre el sistema de acceso 2G/3G y el sistema de acceso LTE.
- SAE Anchor: afecta la movilidad entre los sistemas de acceso 3GPP y los sistemas de acceso no 3GPP.

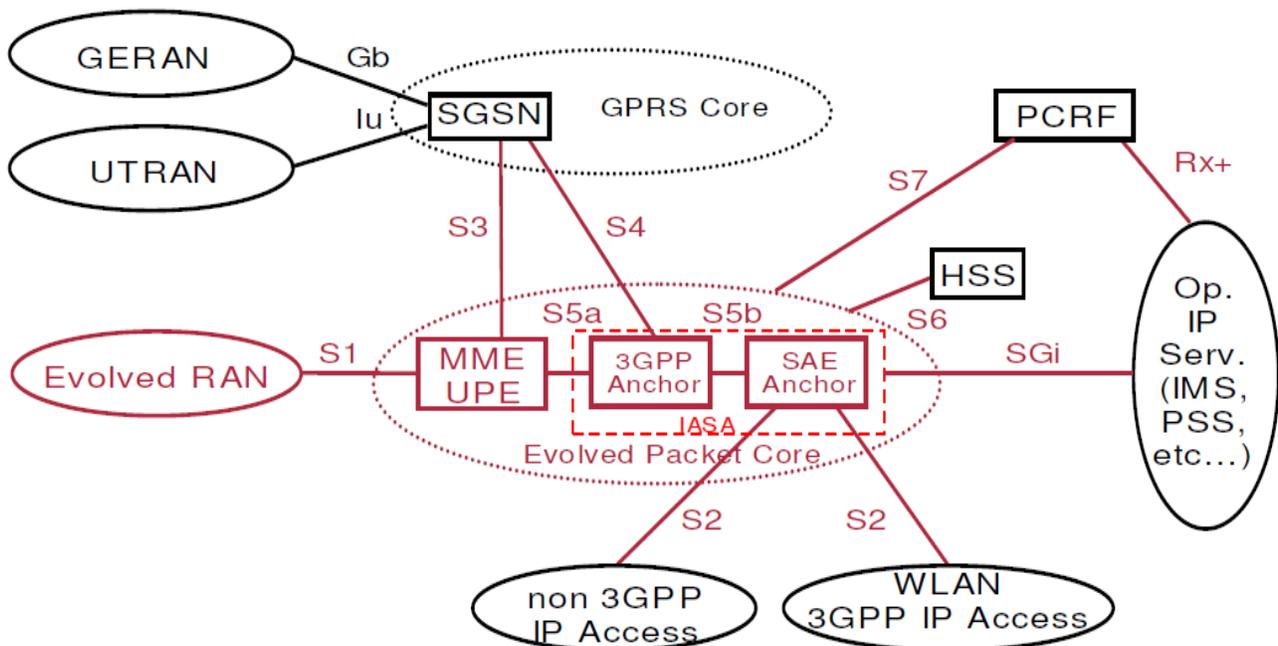


Figura 6. Arquitectura lógica de alto nivel para el System Architecture Evolution (SAE).

Fuente: extraído de [4].



## **Capítulo 2**

### **2. Metodología**

Metodología comienza con una descripción de los software a utilizar: MATLAB® y ATOLL®.

Continúa con una breve descripción de los escenarios propuestos en que se estudiarán a fondo a lo largo de este documento.

Finalmente, se explica el paso a paso para una mejor comprensión del proceso de generación de los escenarios y se introduce el concepto de *Cellfile* y *Drive Test*.



## 2.1. MATLAB®

Es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, visualización y programación. Usando MATLAB®, puedes analizar los datos, desarrollar algoritmos y crear modelos y aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones integradas de matemáticas le permiten explorar múltiples enfoques y llegar a una solución más rápida que con las hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como C / C++ o Java™. Se puede utilizar MATLAB para una gama de aplicaciones, incluyendo el procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imágenes y vídeo, sistemas de control, prueba y medición, las finanzas computacionales, y la biología computacional. Más de un millón de ingenieros y científicos en la industria y la academia utilizan MATLAB® como lenguaje del cálculo técnico. [6]

Cabe destacar que para concebir este simulador, se ha utilizado como referencia el simulador creado por el grupo de investigadores del Institute of Telecommunications de la Vienna University of Technology.

El Grupo de la Universidad Tecnológica de Viena ha desarrollado un simulador basado en MATLAB® formando un compendio de m-files ordenados de forma jerárquica creando así una base de datos .MAT con los cuales pueden simular, a nivel de enlace (Link Level) y a nivel de sistema (System Level), el comportamiento de una red LTE, geo-referenciada, en relación con el tipo de scheduling (planificación) utilizado, tales como Round Robin (RR) o Best Channel Quality Indicator (CQI). [12]

Los alcances del proyecto de Viena fueron muy ambiciosos y no es el propósito de esta tesis crear un simulador sofisticado como el que se ha mencionado pero el estudio de ese proyecto ha servido para poder concebir los resultados esperados y forma parte importante del proceso de familiarización con las herramientas que el software MATLAB® posee para crear simuladores de tecnología celular.

## 2.2 ATOLL®

Es una plataforma de 64 bits para el diseño y optimización de redes inalámbricas multi-tecnología que apoya a los operadores móviles en todo el ciclo de vida de la red, desde el diseño inicial hasta la densificación y la optimización. Entre las tecnologías que el software permite utilizar se encuentran GSM, CDMA, WiMAX, UMTS y LTE. [7]

Para el desarrollo de este trabajo monográfico el uso del software ATOLL® servirá para validar mediante el *cross-checking*, los resultados obtenidos de MATLAB®.

### 2.3 Descripción de los escenarios

A continuación se detallan tres escenarios que serán el foco de investigación de este proyecto monográfico.

#### *Escenario 1: Una celda con un usuario (Single-cell/single-user environment).*

Se simulará un ambiente en el que una celda celular LTE provee servicio a un solo usuario, tal como se aprecia en la figura 7, cuyo recorrido dentro del área de cobertura se considera aleatorio. El objetivo de este escenario es servir de punto de referencia donde se pueda apreciar la máxima eficiencia del estándar LTE en relación a la capacidad de canal. Este escenario será simulado en MATLAB®.

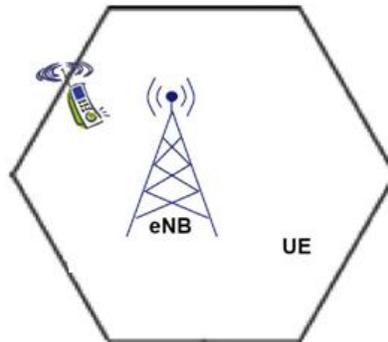


Figura 7. Single-cell/single-user.

Fuente: extraído de [8].

#### *Escenario 2: Una celda con múltiples usuarios (Single-cell/multiuser environment).*

Se simulará un ambiente donde una celda celular LTE provee servicio a varios usuarios al mismo tiempo, tal como se puede apreciar en la figura 8. Los usuarios serán simulados como un recorrido aleatorio donde se verán usuarios cerca de la antena y en el borde de la celda. Este escenario será simulado en ATOLL®.

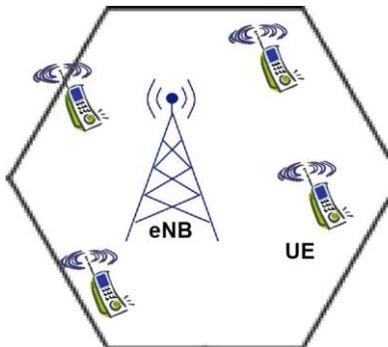


Figura 8. Single-cell/multiuser.

Fuente: extraído de [8].

*Escenario 3: Múltiples celdas con múltiples usuarios (Multicell/multiuser environment).*

Se simulará un ambiente donde múltiples celdas ofrecen servicio a múltiples usuarios al mismo tiempo, tal como se aprecia en la figura 9. El objetivo es crear una simulación a nivel de sistema donde se aprecie el funcionamiento teórico de una red LTE en operaciones y predecir su desempeño en la ciudad de Managua, Nicaragua. Para ello esta simulación se llevará a cabo en ATOLL®. Esta simulación contará con un análisis geo-referenciado de los sitios. Se propondrán KPI de la red creada.

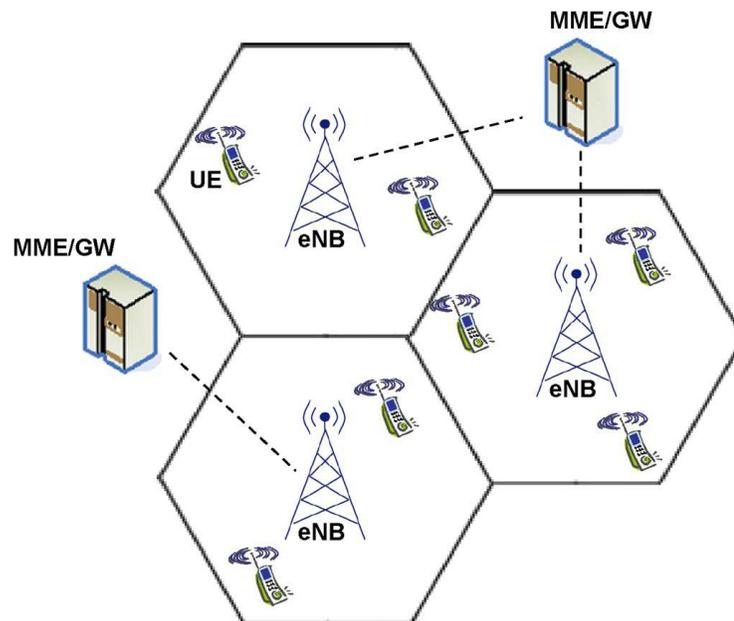


Figura 9. Multi-cell/multiuser.

Fuente: extraído de [8].

## 2.4 Localización de sitios

Para la realización de los escenarios se siguió un procedimiento lógico para la localización de sitios con el fin de generar mapas de cobertura muy similares con un entorno real. Para ello se utilizaron las siguientes herramientas y/o accesorios de hardware y software:

- GPS
- Laptop/PC
- Vehículo
- Software Google Earth
- Software Excel
- Software ATOLL



El siguiente diagrama de flujo detalla el procedimiento usado para la ubicación de cada sitio.

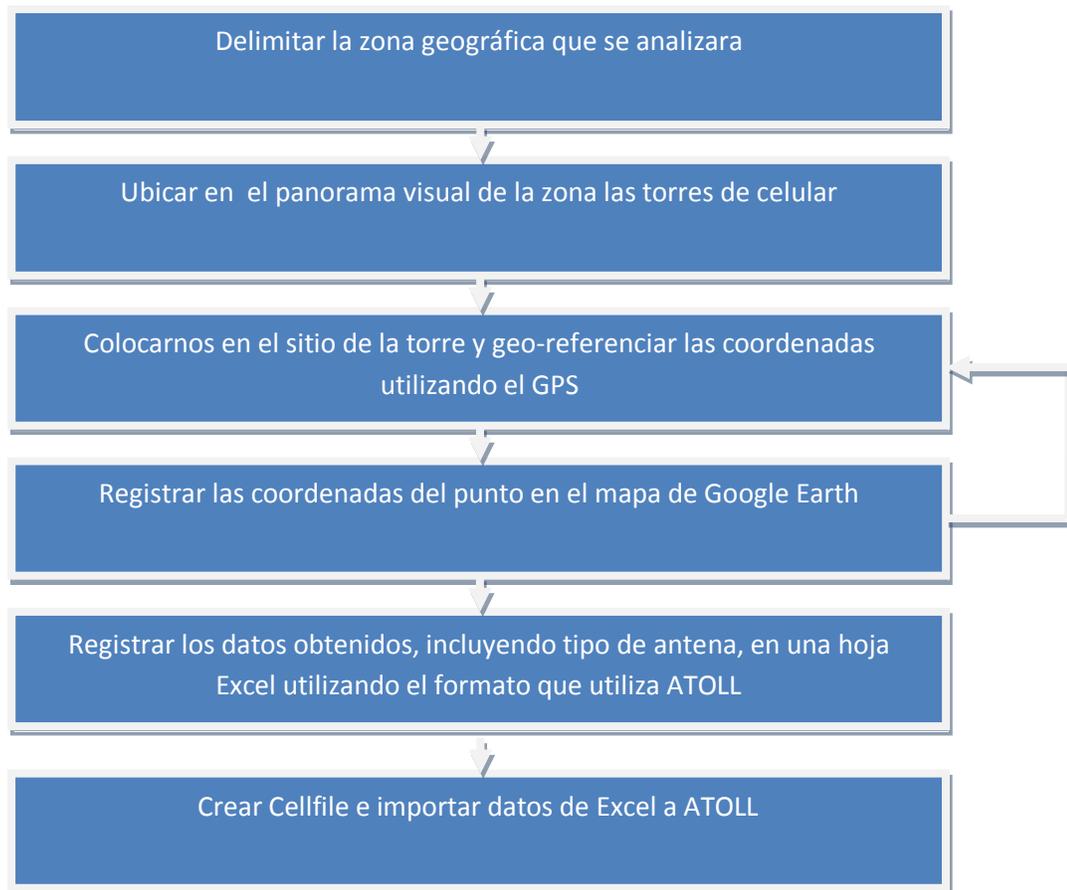


Figura 10. Algoritmo del procedimiento para crear un cellfile.

El propósito de crear un cellfile consiste en tener un archivo cuyo formato pueda ser reconocido y utilizable en ATOLL con el fin de crear los escenarios apropiados y compararlos con las mediciones de campo.

La necesidad de realizar estos pasos radica en el hecho de que un cellfile como el que se necesita para esta clase de estudios incluye información clasificada para las empresas de telecomunicaciones. Entre esos datos se incluyen coordenadas de los sitios, cantidad de sectores, tipo de antena, etc. En vista de que siguiendo estos pasos es posible crear un cellfile con datos aproximados, procedimos a desarrollarlo.

En el Capítulo 3 de esta monografía, se describe en forma detallada el proceso de elaboración de un cellfile.

El Drive Test es una prueba de campo efectuada en las redes celulares, independientemente de su tecnología (GSM, CDMA, UMTS, LTE, etc.). El análisis de



una prueba de Drive Test comprende dos fases: la recolección de los datos y el análisis de los datos recogidos. Básicamente, para llevar a cabo un drive test se usa [9]:

- Una portátil - o hardware similar
- software de colección de datos instalado en la portátil,
- Dongle – (Clave de seguridad del software)
- al menos un teléfono móvil,
- un GPS,
- un Scanner – (opcional).

También es común el uso de un hub de USB e inversor para energizar los equipos.

El principal objetivo de la prueba es recopilar los datos, que se puedan observar y analizar en tiempo real (en vivo). Durante la prueba, se puede obtener información del rendimiento de la red en el campo. Los datos de todos los equipos se agrupan por el software de recogida y son almacenados en uno o más archivos de salida conocidos como log files. [9]

- GPS: recogida de los datos de latitud y longitud de los datos de cada punto/medida, tiempo, velocidad, etc. También es útil como una guía para implementar las rutas correctas.
- MS: recolección de datos móviles, tales como intensidad de la señal, en el mejor servidor, etc.
- SCANNER recoge datos a través de la red, ya que el teléfono móvil es limitado y no maneja todos los datos necesarios para un análisis más completo.

La práctica de un Drive Test es importante porque nos permitirá verificar los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en MATLAB® y ATOLL®.

A continuación se ejemplifica la planificación básica de un Drive Test.

Las rutas de Drive Test son el primer paso para definir, luego el área geográfica donde se recogerán los datos. Esta área se define en función de varios factores, principalmente relacionados con el objetivo de la prueba. Un programa muy útil en este campo es Google Earth. Una buena práctica consiste en trazar la misma ruta, con los caminos fáciles o polígonos. [9]

Para trazar la ruta del Drive Test para este trabajo, se necesita información de los operadores de telecomunicaciones en el país en cuanto a zonas de mayor demanda y mayor concentración de cellsites.



En Nicaragua, existen distintos proveedores de telefonía celular e internet. Desafortunadamente, y para fines de tener información precisa, no existen puntos de 4G o LTE en el país. Sin embargo, a nivel del servicio de datos, el proveedor de servicios de internet Yota de Nicaragua utiliza la alternativa a LTE: WiMAX. Con ello se puede establecer una comparativa entre las dos tecnologías y dar validez a los resultados.

Para poder realizar mediciones de campo de la red de Yota, contactamos al Ing. Dmitry Yerankevich Gerente Técnico de Yota de Nicaragua el cual hizo posible una pasantía en dicha empresa con el objetivo de obtener la información pertinente para este trabajo monográfico. Yota de Nicaragua colaboró con nuestro trabajo bajo el término de respetar la confidencialidad de la empresa.

Yota de Nicaragua nos ofreció la posibilidad de realizar los Drive Test proporcionando todo el equipamiento necesario para la realización de los mismos y participando con el personal técnico de la empresa en la realización de dichas pruebas.

#### **2.4.1 YOTA de Nicaragua.**

Yota es una empresa rusa desarrolladora y proveedora de servicios innovadores de telecomunicaciones móviles. Yota es una de las compañías líderes mundiales en proveer servicios con tecnologías WiMAX de 4G y la puesta en funcionamiento de redes basadas en esa tecnología. La red opera bajo el estándar IEEE 802.16e-2005 con la frecuencia 2.5-2.7 GHz. Para mayor información acerca de la empresa, se puede visitar el sitio web en la siguiente dirección: [www.yota.ru/es](http://www.yota.ru/es).

De igual forma solicitamos información técnica, accediendo a la petición. Esta información se detalla a continuación.

- Yota de Nicaragua opera en la banda de 2.5 GHz (UL: 2500 – 2530MHz; DL: 2620 – 2650MHz).
- Tipos de antenas que utilizan son de marca Andrew para la banda de 2500MHz.
- Tipos de transmisores son de marca Samsung con una potencia de 4 W.
- Las alturas de las antenas oscilan entre 20 y 30m en algunos casos hasta 46m.
- Los lugares de mayor tráfico en la ciudad de Managua son mercado oriental, metrocentro y carretera a Masaya entre los horarios de 8AM a 6PM (Mercado oriental); para las otras localidades es por encima de las 3 de la tarde.
- El número de emplazamiento en Managua oscila entre 35 a 40 sitios.

A continuación se presenta la planeación de los Drive test a realizar.

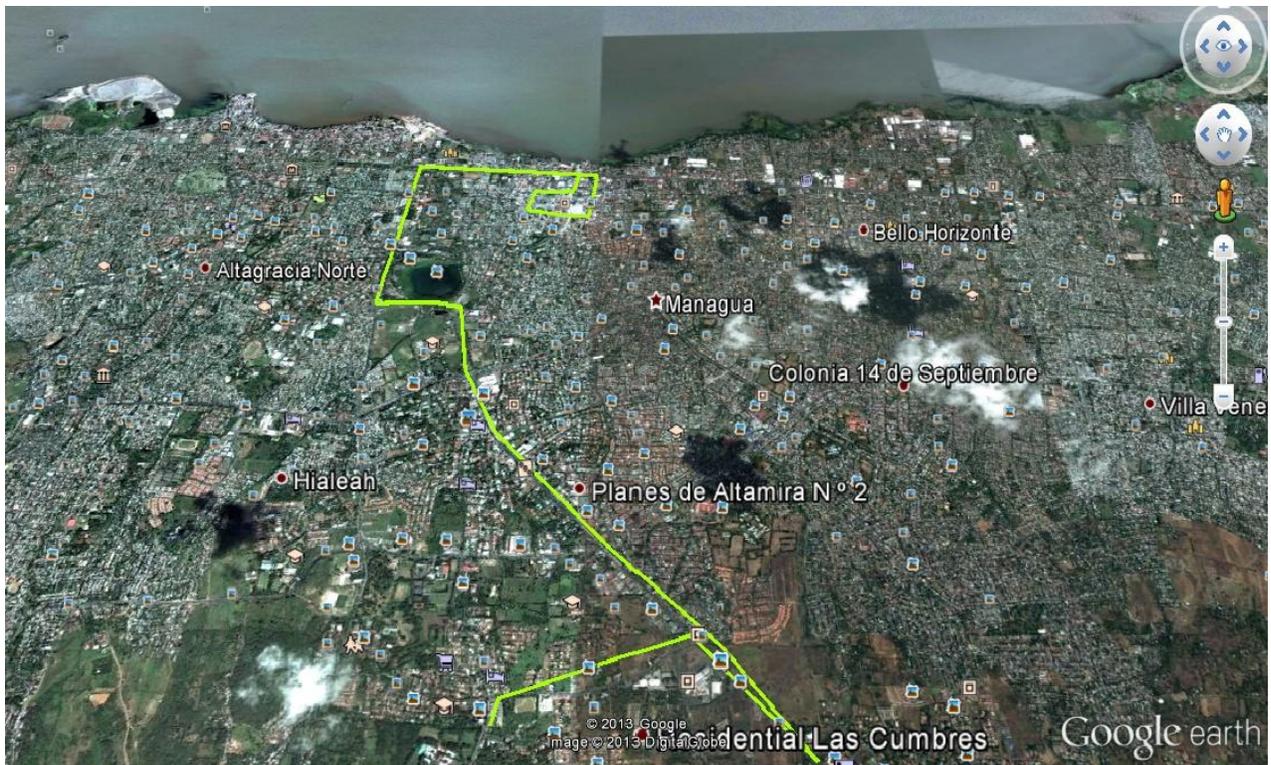


Programación de Drive Test Yota Nicaragua.

No.	Actividad	02-abr	05-abr	12-abr	19-abr	26-abr	Obs
1	Reunión de coordinación	X					1 a 2 pm
2	Reunión Técnico y 1er Drive Test		X				2 a 5 pm
3	Reunión Técnica 2do Drive Test			X			2 a 5 pm
4	Reunión Técnica 3er Drive Test				X		2 a 5 pm
5	Reporte Final					X	2 a 4 pm

Tabla 1. Programación de Drive Test Yota de Nicaragua.

Así mismo se realizó el plan de recorrido para los drive test el cual será el mismo por cada repetición, como parámetros para la realización del recorrido es la hora que será entre las 2:00 PM – 5:00 PM; saliendo de las instalaciones de Yota hacia el mercado oriental (bordeándolo) hasta dirigirse a carretera a Masaya (Las colinas) terminando en las Instalaciones de Yota (ver figura 11). El procesado de los resultados de cada repetición (Drive Test) estará a cargo del personal de Yota y los resultados serán entregados para ser reportados dentro del trabajo de exposición.



**Figura 11. Ruta de Drive Test para Yota de Nicaragua.**

En el siguiente capítulo se presentaran los resultados de los Drive Test realizados con Yota. En el Anexo C se ven las gráficas generadas por el software de Drive Test utilizado en Yota, OptisWX®.



## **Capítulo 3**

### **3. Mediciones, Simulaciones y Análisis de Resultados**

El presente capítulo comienza con una descripción de la red LTE.

Sigue con las simulaciones de los escenarios propuestos utilizando MATLAB® y ATOLL®.

Además, se exponen los resultados obtenidos de los Drive Test con Yota de Nicaragua.

A continuación, se hace un análisis comparativo de todos los resultados y se proponen los KPI para la etapa de diseño de una red LTE.

Finalmente, se realiza una discusión acerca de los resultados obtenidos.

### 3.1 LTE

Primero, analizamos la red de acceso (RAN) en LTE. Entendamos la RAN como la parte comprendida entre la interfaz aérea y las estaciones base dentro de la red celular. Adicionalmente a esto, la red total incluye un núcleo de red, que en el caso de LTE se le denomina EPC, el cual provee el backbone y los servicios. El termino RAN es utilizado por GSM y UMTS. En el caso de LTE, la RAN es denominada E-UTRAN y se muestra en la figura 12.

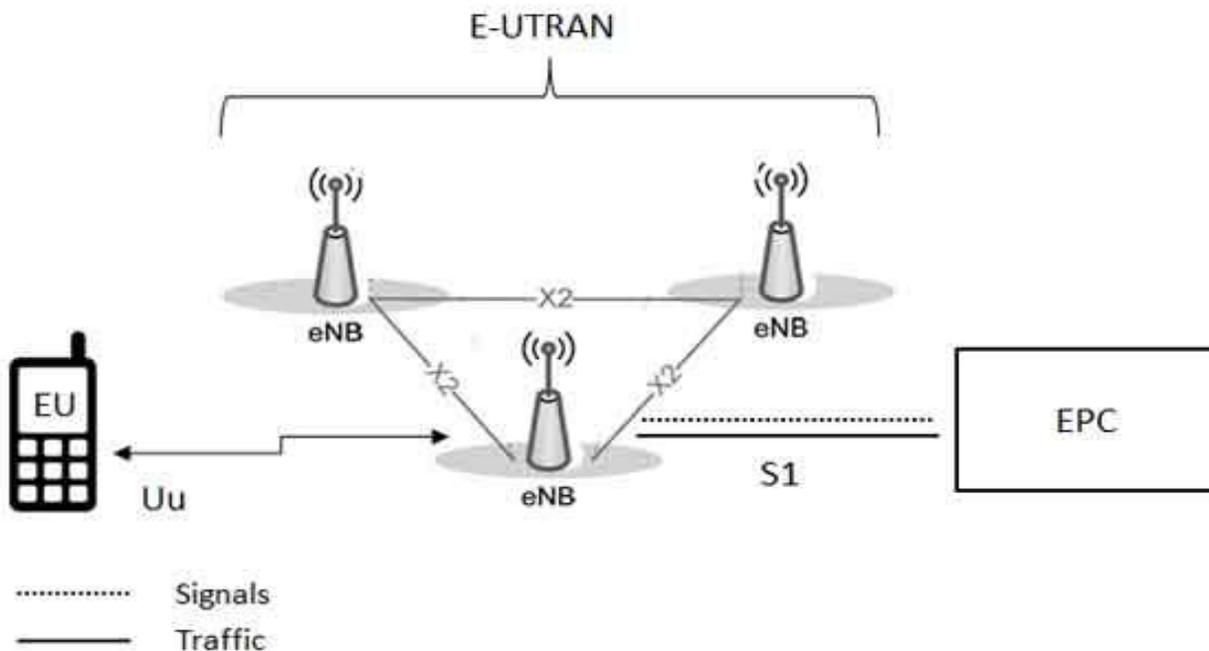


Figura 12. Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN).

Fuente: extraído de [10].

La E-UTRAN maneja las comunicaciones de radio entre el teléfono móvil y el EPC utilizando su único componente que es la estación base evolucionada, denominada eNodeB o bien eNB. Cada eNB es una estación base que controla los equipos móviles (UE) en una o más celdas. La estación base que está comunicándose con un UE es conocido como la eNB servidora. [10]

El UE de LTE se comunica con una sola estación base y una celda a la vez y aquí se dan las siguientes dos funciones principales que soporta la eNB:

- La eNB envía y recibe transmisiones de radio a todos los UE usando las funciones de procesamiento de señal analógica y digital de la interfaz aérea LTE.
- La eNB controla las operaciones de bajo nivel de todos sus móviles, al enviarles mensajes de señalización tales como los comandos de handover.

Como sabemos, LTE viene a ser la antesala para las redes 4G. Es por ello que se pueden apreciar muchas mejoras respecto a GSM, GPRS y UMTS las cuales son sus predecesores naturales. Las mejoras pueden apreciarse gráficamente en la figura 13. A continuación se enumeran las mejoras que fueron objeto de estudio para esta investigación.

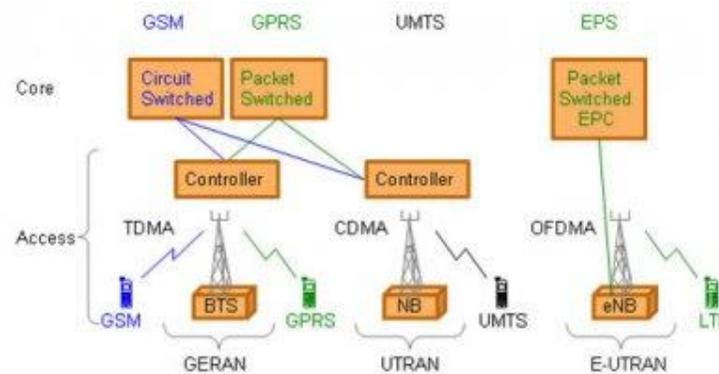


Figura 13. Soluciones de Red desde GSM hasta LTE.

Fuente: extraído de [11].

### 3.1.1 E-UTRAN vs Predecesores

GSM fue desarrollado para llevar a cabo servicios en tiempo real, utilizando conmutación de circuitos (en azul en la figura 13), con servicios de datos que sólo son posibles a través de una conexión de modem de circuitos conmutados, con velocidades de datos muy bajas. El primer paso hacia una solución basado en IP de paquetes conmutados (en verde en la figura 13) se hizo con la evolución de GSM a GPRS, utilizando la misma interfaz de aire y el método de acceso, TDMA. [11]

Para alcanzar mayores velocidades de datos y volumen de datos, UMTS fue desarrollado con una nueva red de acceso, basada en la tecnología CDMA. La red de acceso UMTS emula una conexión basada en conmutación circuito para servicios en tiempo real y una conexión de conmutación de paquetes para los servicios de comunicación de datos (en negro en la figura 13). En UMTS, la dirección IP se asigna al UE cuando se establece un servicio de comunicación de datos y la libera cuando se detiene el servicio. Servicios de comunicación de datos entrantes siguen, por lo tanto, dependiendo del núcleo de conmutación de circuitos para paginación. [11]

El EPS es puramente basado en IP. Tanto los servicios en tiempo real y servicios de comunicación de datos se realizan por el protocolo IP. La dirección IP se asigna cuando el móvil está encendido y se libera cuando se desconectan. La nueva solución de acceso, LTE, se basa en OFDMA para ser capaz de alcanzar velocidades y



volúmenes de datos aún más altas. Modulación de orden superior (hasta 64QAM), gran ancho de banda (hasta 20 MHz) y la transmisión Multiple Input Multiple Output (MIMO) en el enlace descendente (hasta 4x4) es también una parte de la solución. La velocidad de datos máxima teórica es 170 Mbps en el enlace ascendente y con MIMO la tasa puede ser tan alta como 300 Mbps en el enlace descendente. El EPC está preparado para trabajar con otras tecnologías de acceso no desarrollados por el 3GPP, como WiMAX y WiFi. [11]

### 3.1.2 Tasa de Datos Alta

Los fundamentos para transmitir una alta tasa de datos sigue los lineamientos de la ecuación de Shannon, el cual provee las herramientas teóricas básicas necesarias para determinar la tasa máxima, también es conocido como Capacidad de Canal, la cual establece como la información se transfiere a través de un canal de comunicaciones dado. La ecuación para la Capacidad de Canal,  $C$ , está dada por la siguiente expresión [2]:

$$C = BW * \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

En donde  $BW$  es el ancho de banda disponible para la comunicación,  $S$  denota la potencia de la señal recibida y  $N$  denota la potencia del ruido blanco que incide en la señal recibida. Queda claro entonces que la cantidad de información que se puede transmitir está limitada por dos factores: la relación señal a ruido y el ancho de banda. [2]

Los retos de hoy en día están asociados a transmitir datos en mayor cantidad y a mayor velocidad. Es debido a esto que superar las limitaciones del canal de Shannon es imperativo. Dicho esto nos encontramos que al momento de transmitir una señal se nos presentan escenarios donde una tasa alta de datos se ve limitado por el ruido y/o interferencias. Estas dificultades pueden ser superadas haciendo uso de alguno de los siguientes métodos:

- Aumentar la potencia de transmisión.
- Reducir el radio de cobertura de una celda.
- Utilizar multiplexación espacial.
- Ubicar la fuente de señal interferente y removerla.
- Aumentar el ancho de banda ( $BW$ ).

Sin embargo, estos métodos mencionados no son precisamente eficientes ni eficaces. Por ejemplo, aumentar la potencia o la utilización de MIMO permitirá transmitir más datos pero solamente hasta donde el BW permita. Reducir el tamaño de la celda reducirá también el número de clientes que se pueden atender y habrá saturación de sitios con mayor frecuencia. [2]

Dicho esto transmitir tasas datos mayores a lo que el BW permite requiere una relación desproporcionadamente alta de la señal a ruido/interferencia en el receptor. Además, el BW es un recurso generalmente caro y escaso. Es por ello que los sistemas celulares deben ser diseñados para transmitir una gran cantidad de datos en un BW limitado. Para lograr esto se requiere la utilización de Modulación de Orden Superior. Existen diferentes métodos de modulación de orden superior [2]:

- **QPSK:** En este caso, es un esquema utilizado para el DL en los primeros diseños del estándar 3G de comunicaciones móviles (WCDMA y CDMA2000), el alfabeto de modulación consiste en cuatro señales alternativas diferentes, las cuales se ilustran como cuatro diferentes puntos en un plano bidimensional (ver figura 14). Con esto, QPSK permite que se comuniquen hasta 2 bits de información durante cada intervalo de símbolo de modulación.
- **16QAM:** Se trata de una extensión del QPSK, en donde 16 señales alternativas diferentes están disponibles (ver figura 14). El uso de 16QAM permite que hasta 4 bits de información se comunican por cada intervalo de símbolo.
- **64QAM:** Se da una mayor extensión donde 64 señales alternativas diferentes permiten que se comuniquen hasta 6 bits de información por intervalo de símbolo (ver figura 14). Al mismo tiempo, el BW de la señal transmitida es, al menos en principio, independiente del tamaño del alfabeto de modulación y depende principalmente de la tasa de modulación – eso es, el número de símbolos de modulación por segundo.

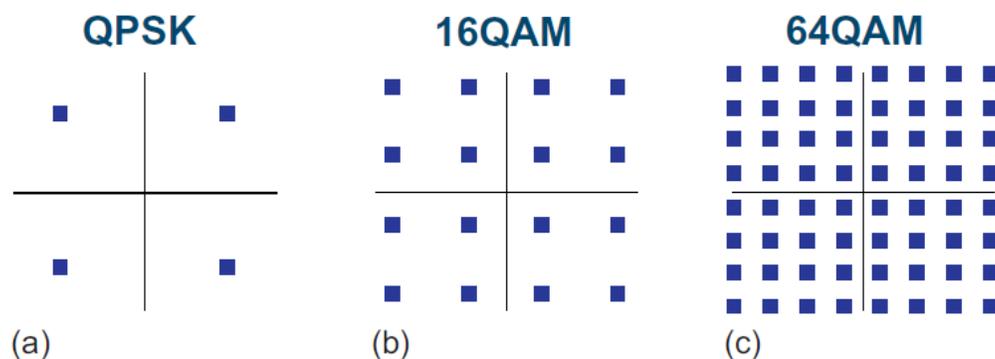


Figura 14. Diagrama de señalización para: a) QPSK; b) 16QAM; c) 64QAM.

Fuente: extraído de [2].



La utilización máxima de BW se expresa en bits/s/Hz. En 16QAM y 64QAM son, al menos en principio, 2 o 3 veces más que en QPSK, respectivamente. Cabe destacar que hay muchos otros posibles esquemas de modulación además de los ya mencionados pero no serán considerados como parte de esta investigación. Esto es debido a que el estándar LTE utiliza estos tres esquemas de modulación mencionados anteriormente tanto para el UL como el DL así como OFDMA como esquema de transmisión, el cual abordamos en el Capítulo 1.

El uso de modulación de orden superior provee la posibilidad de una más alta utilización del BW – eso es, la capacidad de proveer mayores tasas de datos para un BW dado. Sin embargo, la mayor utilización del BW se logra a costa de reducir la fortaleza contra ruido e interferencias. Dicho de otra manera, los esquemas de modulación de orden superior, tales como 16QAM o 64QAM, requiere una más alta  $E_b/N_0$  en el receptor para una probabilidad de bit de error dado, comparada con QPSK. [2]

## **3.2 Simulación de los escenarios**

A continuación se exponen los resultados obtenidos de las simulaciones en MATLAB® (versión 7.12.0 R2011a) y ATOLL® (versión 2.8.0).

### **3.2.1 Aspectos a considerar**

Para poder obtener resultados fiables que se asemejen a la realidad necesitamos utilizar los métodos que la ciencia en las telecomunicaciones ha creado con el fin de modelar las redes celulares para su posterior despliegue.

Los modelos de propagación permiten visualizar el comportamiento de una red en operación al momento de realizar el diseño. Esto se debe a que puede calcular valores basado en la orografía del terreno y/o las estructuras urbanas que existen en un área determinada.

Debido a que esta monografía pretende analizar escenarios donde se utiliza la tecnología LTE, a nivel de simulación, es importante conocer la influencia del modelo de propagación a utilizar en los resultados que se esperan, tanto en MATLAB® como en ATOLL®.

#### *Modelo de Propagación en MATLAB®*

En este software se simulara el escenario 1 el cual es de control y, por tanto, se obtendrá un resultado ideal. Es por ello que las simulaciones en este caso se harán con el modelo de espacio libre (free space).



### *Modelo de Propagación en ATOLL®*

En este software se cuenta con herramientas más avanzadas y especializadas para diseño de redes inalámbricas. Es por ello que escoger el modelo de propagación apropiado es importante para la obtención de resultados coherentes con lo que sería la realidad.

Existen una gran cantidad de modelos de propagación en la literatura y no es el propósito de esta tesis estudiar a fondo este tema. Sin embargo, nos centraremos en dos modelos.

El modelo más conocido, y utilizado, es el Modelo de Hata (conocido también como fórmula de Okumura-Hata) es una formulación empírica de las pérdidas de trayectorias mostradas en las gráficas de Okumura. El modelo de Hata para el cálculo de pérdidas en un entorno urbano es [13]:

$$L_{Okumura\ Hata-Urbana} (dB) =$$

$$69.55 + 26.16 * \log(f) - 13.82 * \log(h_{te}) - a(h_{re}) + [44.9 - 6.55 * \log(h_{te})] * [\log(d)]^b$$

Donde:

- hte: Altura de antena en estación base (m)
- hre: Altura de antena del móvil (m)
- f: Frecuencia (MHz)
- d: Distancia de separación entre Tx y Rx (Km)
- a(hre): Factor de corrección de la altura de la antena móvil.
- b=1: Para d < 20 Km.

El modelo de Okumura fue originalmente diseñado para tres modalidades, una para zonas urbanas, suburbanas y áreas abiertas. El modelo para áreas urbanas fue desarrollado primero y usado como base para los demás. El modelo Okumura-Hata también tiene dos variedades adicionales para propagación en áreas suburbanas y áreas abiertas. El modelo de Okumura original para áreas urbanas es un modelo de radio propagación que fue construido usando datos recolectados en la ciudad de Tokio, Japón. [14]

El modelo es ideal para usarse en ciudades con muchas estructuras urbanas pero no muchas estructuras altas obstaculizantes. El modelo sirve como base para el modelo de Hata y las siguientes restricciones aplican para el modelo de Okumura-Hata [14]:



Parámetro	Restricción
Rango de frecuencia (f)	150 MHz – 1500 MHz
Distancia Estación Base (EB) – UE (d)	1 Km – 20 Km
Altura de antenas EB (h <sub>te</sub> )	30 m – 200 m
Altura de antenas Terminales (h <sub>re</sub> )	1 m - 10 m

Tabla 2. Restricciones del Modelo Okumura-Hata.

Fuente: extraído de [13].

Existen diversas modificaciones que se le pueden hacer a la fórmula de Okumura-Hata con el fin de adaptarla a ambientes suburbanos y rurales, así como para considerar distancias mayores a 20 Km y corregir la altura de la antena receptora para analizar ciudades grandes, medianas y pequeñas, pero todas se basan en la fórmula anterior para zonas urbanas.

En vista de los últimos avances en la tecnología celular, se han derivado nuevos modelos que se adapten mejor a las rigurosidades de los nuevos estándares. Como es un trabajo científico, se basan en modelos anteriores y realizan algunos cambios.

El modelo de propagación estándar o SPM (deducido de la fórmula de Hata) se adapta a las tecnologías GSM900/1800, UMTS, CDMA2000, WiMAX y LTE. Este modelo usa un perfil de terreno, mecanismos de difracción (calculado en diversas maneras) y considera clases de clutter y la altura efectiva de la antena para poder calcular las pérdidas de trayecto. El modelo puede ser usado para cualquier tecnología; está basado en la siguiente fórmula [14]:

$$L_{SPM}(dB) =$$

$$K_1 + K_2 * \log(d) + K_3 * \log(h_{teff}) + K_4 * DiffractionLoss + K_5 * \log(d) * \log(h_{teff}) + K_6 * h_{reff} + K_{clutter} * f(clutter)$$

Donde:

- K1: Constante offset (dB)
- K2: Factor multiplicador para log(d)
- d: Distancia entre el receptor y el transmisor (m)
- K3: Factor multiplicador para log(h<sub>teff</sub>)
- h<sub>teff</sub>: Altura efectiva de la antena transmisora (m)



- K4: Factor multiplicador para cálculos de difracciones, K4 debe ser un número positivo
- DiffractionLoss: Pérdidas por difracción a través de un trayecto obstruido (dB)
- K5: Factor multiplicador para  $\log(d)\log(h_{\text{teff}})$
- K6: Factor multiplicador para  $h_{\text{reff}}$
- $h_{\text{reff}}$ : Altura de la antena móvil (m)
- Kclutter: Factor multiplicador para  $f(\text{clutter})$
- $f(\text{clutter})$ : Promedio de las pérdidas ponderadas debido a clutter.

La siguiente tabla muestra las restricciones de este modelo [14]:

Parámetro	Restricción
Rango de frecuencia (f)	150 MHz – 3500 MHz
Distancia Estación Base (EB) – UE (d)	1 Km – 20 Km
Altura de antenas EB ( $h_{\text{teff}}$ )	Efectiva
Altura de antenas Terminales ( $h_{\text{reff}}$ )	Efectiva

Tabla 3. Restricciones del Modelo Estándar.

Fuente: extraído de [14].

El modelo que usaremos en las simulaciones es el SPM. A pesar de que tienen características similares, este modelo se ajusta más a los requerimientos del estándar LTE en cuanto al rango de frecuencias que puede utilizar.

El SPM es considerablemente bueno en términos de pérdidas de trayecto en todos los terrenos tales como Urbano, Suburbano y Rural para las bandas usadas en LTE. El SPM ha mostrado un desempeño superior frente a todos los otros modelos de propagación. Las herramientas de planificación en RF actuales usan el SPM para la planeación del despliegue de una red LTE. [14]

El software ATOLL® considera el SPM por defecto para las plantillas de proyecto que usan LTE y se puede ajustar para el ambiente urbano y suburbano presente en la ciudad de Managua. La figura 15 nos muestra los valores de los parámetros K que ha determinado para el SPM. Estos valores se obtienen de forma empírica haciendo múltiples drive test en zonas determinadas y de este modo se pueden establecer parámetros K para cualquier ciudad en el mundo. Los valores



mostrados en la figura 14 son generalizados y serán utilizados de esa manera para las simulaciones realizadas en ATOLL®.

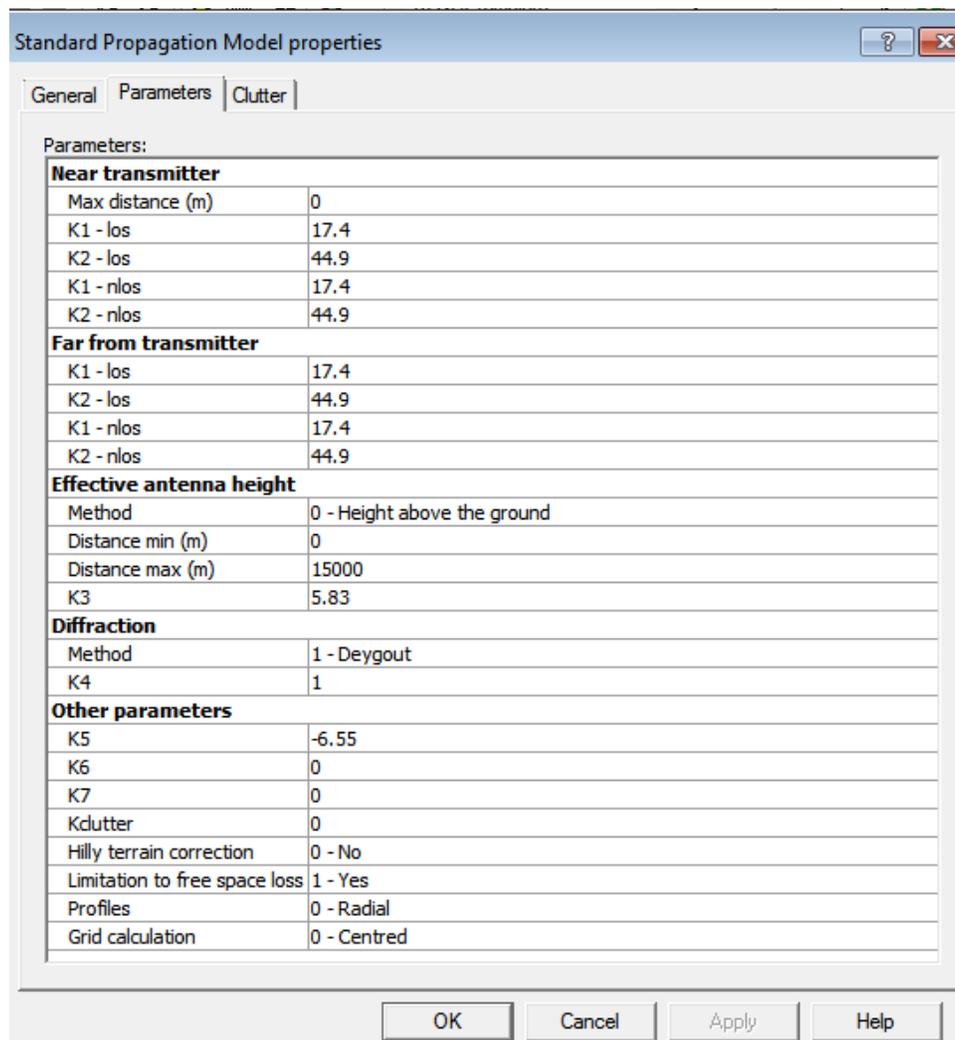


Figura 15. Parámetros K por defecto para el SPM en ATOLL®.

### *Diseño de una Red LTE en Managua utilizando ATOLL®*

Para crear un diseño de red en Managua, partimos del concepto de coubicación de sitios. Utilizando el algoritmo de la figura 10, se obtuvo información de sitios de red celular en Managua. Esta información incluye: coordenadas geográficas y azimut.

El siguiente algoritmo muestra los pasos que se deben seguir para la creación de una red LTE y su correspondiente simulación.

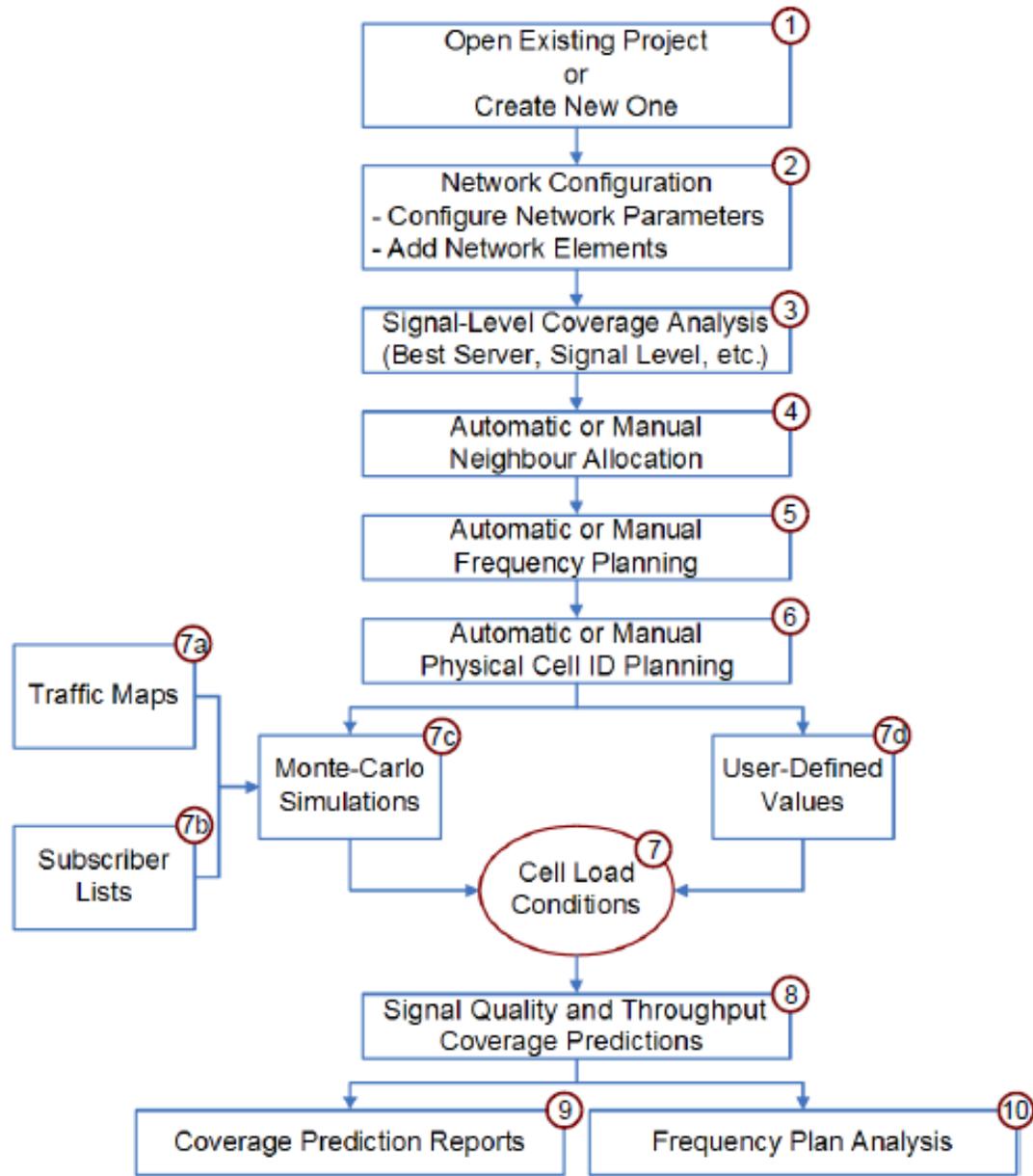


Figura 16. Algoritmo de Diseño de una red LTE.

Fuente: extraído de [18].

Escogiendo la banda de frecuencia y el tipo de antena podemos generar un mapa de cobertura utilizando ATOLL®. Para ello se crea un archivo formato .txt que el software pueda importar y asignar a su base de datos. El archivo se conoce como *cellfile*.



Este archivo debe contener, entre otras cosas, los siguientes datos para importarlos a ATOLL®:

- Coordenadas geográficas del sitio.
- Cantidad de sectores por sitio (cada sitio debe tener un nombre clave para sus respectivos sectores; en ATOLL®, los sectores se conocen como transmisores).
- Banda de Frecuencia (posee datos de las bandas de 900, 1800 y 2100 MHz por defecto)
- Tipo de Antena, lo cual debe incluir:
  - Nombre.
  - Ganancia (dBi).
  - Fabricante.
  - Patrón de Radiación y Polarización.
  - Tilt.
  - Ancho de haz.
  - Frecuencia de trabajo (mínima y máxima).
- Modelo de propagación.
- Altura de antena.
- Azimut.

En Nicaragua, la ubicación de sitios ha sido contemplada en la “Ley que Regula la Ubicación, Construcción e Instalación de Estructuras de Soporte para Equipos de Telecomunicaciones que hacen uso del Espectro Radioeléctrico” #843, aprobada el 27 de Junio del año 2013, con el fin de contrarrestar los problemas económicos, sociales y paisajísticos que conlleva la construcción de nuevos sitios celulares. [16]

Es por ello que la ubicación será uno de los principios que usaremos para el diseño ya que existe la posibilidad de que en la práctica las empresas, tanto las que ya están en operación como las que puedan entrar en operación al país, utilicen sitios con estructuras existentes para colocar nodos de LTE.

### *Simulación de Monte Carlo*

Una simulación Monte Carlo permite tener una instantánea del desempeño de una red obteniendo así datos como distribución geográfica de los usuarios con sus respectivas demandas de tráfico, la asignación de los recursos a cada uno de los usuarios simulados y las cargas de tráfico de las celdas. En los escenarios que tengan ambientes multi-usuarios, usamos este tipo de simulación.



La siguiente tabla muestra otros parámetros considerados para las simulaciones.

No	Parámetro	Valor	Comentarios
1	Banda de Operación (MHz)	700	Banda 12 de LTE. Conforme al Acuerdo Administrativo 007-2005 de Telcor. Véase Anexo D.
2	Tipo de Antena	Kathrein 700 MHz	Para simulaciones en MATLAB® y ATOLL®.
3	Codificación de Canal	N/A	Para simulaciones en MATLAB®.
4	Altura de Antena Móvil (m)	1.5	
5	Altura de Estaciones Base (m)	30	
6	Tilt de Antenas	0	Debido a que es etapa de diseño.
7	Tipo de UE	Categoría 2-4	Conforme a las especificaciones para UE del Release 8 de 3GPP.
8	Declaración de Celdas Vecinas	Auto	

Tabla 4. Parámetros usados en las simulaciones.

### 3.2.2 Escenario 1

Utilizando el M-File creado (véase Anexo A), introducimos los siguientes parámetros para crear el escenario:

Datos Requeridos	Valores
<b><u>Introduzca la potencia de transmisión (W):</u></b>	4
<b><u>Introduzca el radio de cobertura (m2):</u></b>	3000
<b><u>Introduzca el número de radio transmisores por arreglo:</u></b>	3
<b><u>Introduzca el número de antenas por arreglo:</u></b>	3
<b><u>Introduzca la alturas de las antenas (m):</u></b>	30
<b><u>Introduzca la altura promedio de una persona (m):</u></b>	1.5
<b><u>Introduzca la banda de operacion en LTE (MHZ):</u></b>	700
<b><u>Introduzca el Tilt de la Antena (grados):</u></b>	0
<b><u>Introduzca la Ganancia de la Antena (dBi):</u></b>	13.8
<b><u>Introduzca el beamwidth de la Antena (grados):</u></b>	64.04
<b><u>Introduzca el numero de pasos del camino aleatorio:</u></b>	360
<b><u>Introduzca la banda para downlink en LTE (MHZ):</u></b>	700
<b><u>Introduzca el numero de repeticiones:</u></b>	3

Tabla 5. Parámetros introducidos en MATLAB®

En las siguientes figuras, de la 17 a 19, se aprecia una celda celular LTE, con tres sectores, y un usuario recorriendo el área de cobertura en 3 diferentes ubicaciones. Los valores X y Y denotan las coordenadas del usuario en un punto determinado del plano. El valor Z denota la potencia recibida en ese punto, medida en Watts.

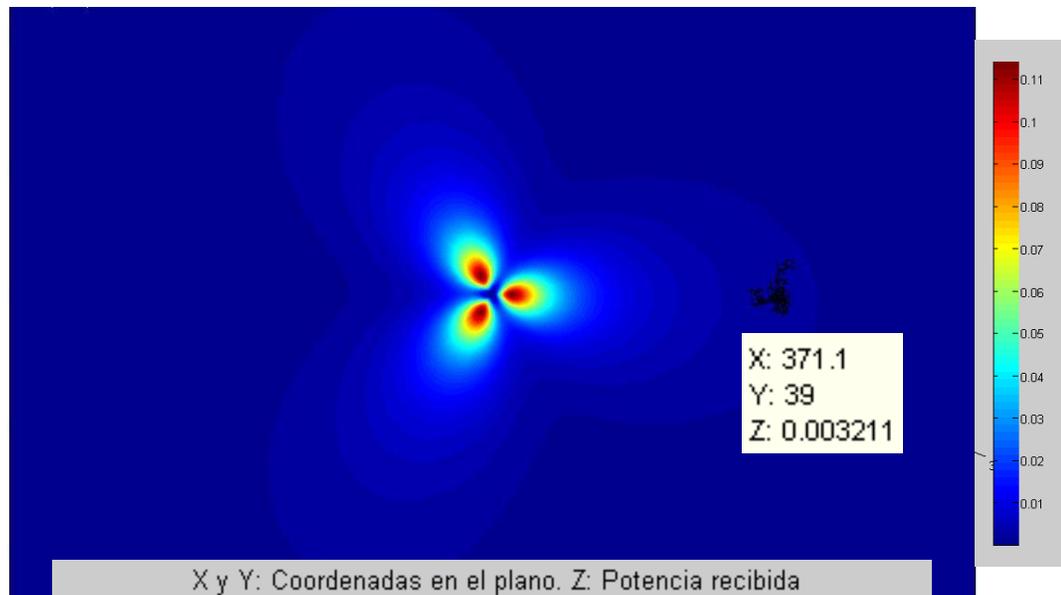


Figura 17. Usuario en el borde de la celda.

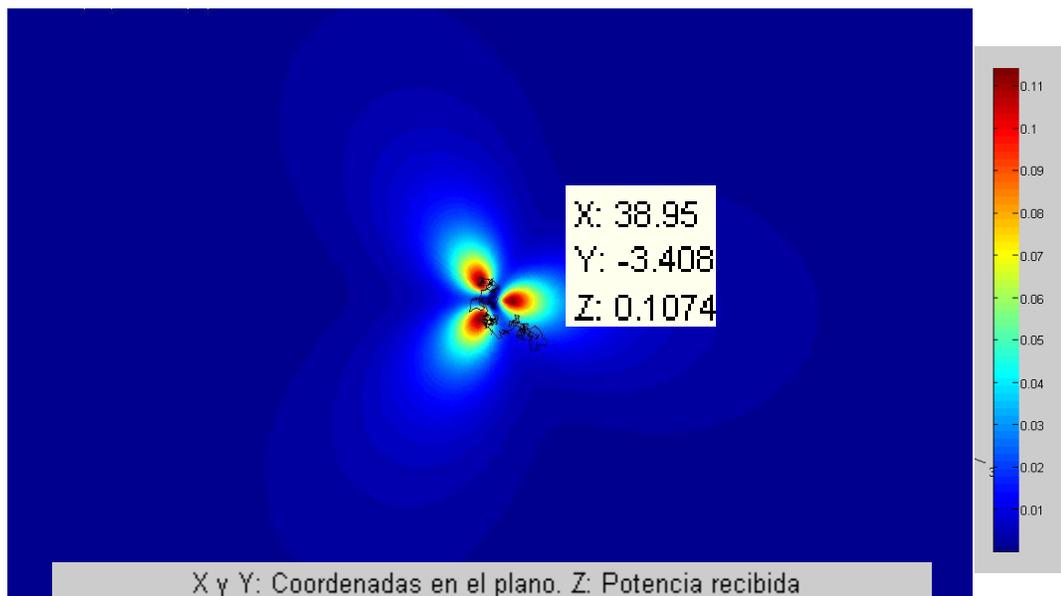


Figura 18. Usuario dentro de la celda.

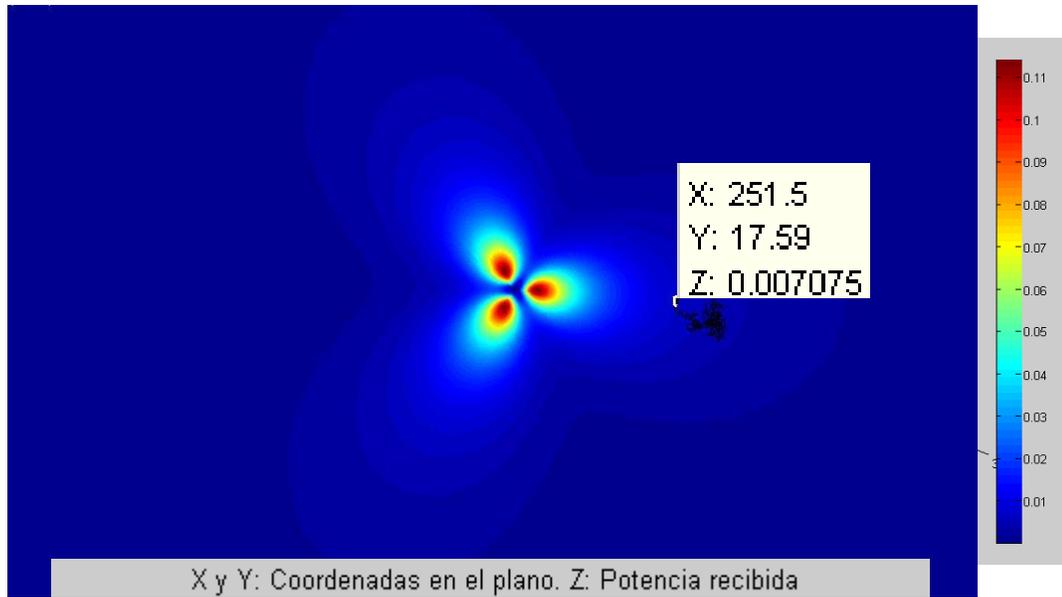


Figura 19. Usuario en la mitad de la celda.

Como sabemos, LTE incluye de manera integrada el sistema MIMO como parte del estándar. Para poder ver el efecto de que causa la inclusión de esta tecnología en la capacidad de canal, utilizaremos otro M-File de MATLAB® (véase Anexo B) donde se obtienen los siguientes resultados (figuras del 20 al 22):

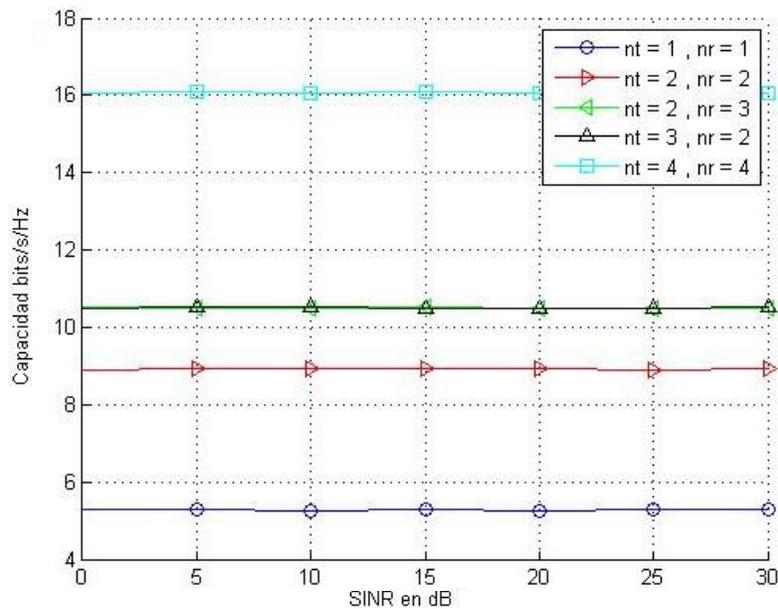


Figura 20. Capacidad de Canal en el Borde de la Celda.

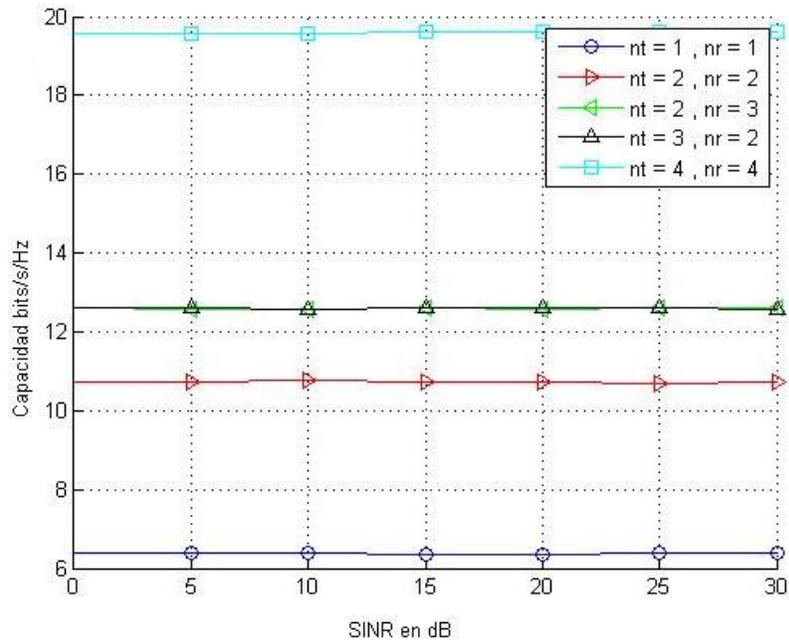


Figura 21. Capacidad de Canal en la Mitad de la Celda.

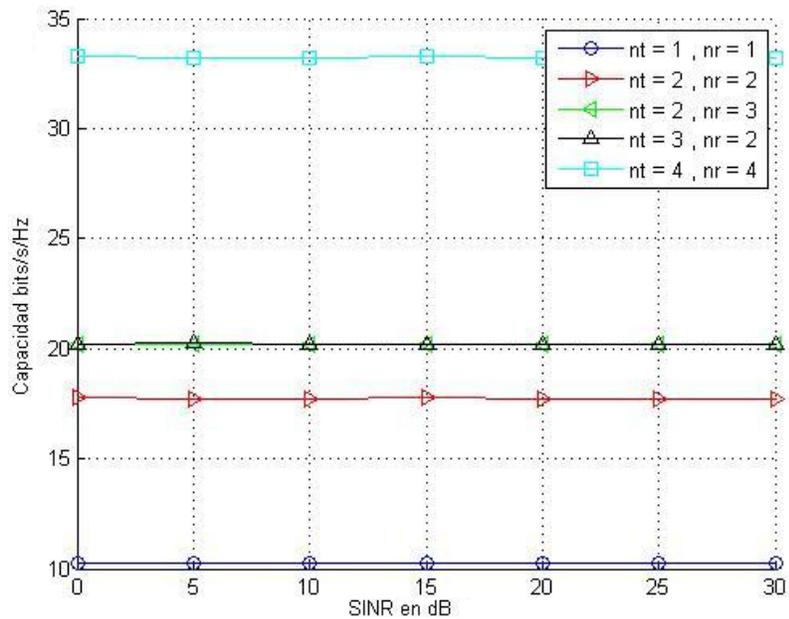


Figura 22. Capacidad de Canal Cerca de la Celda.

Para comprobar que los valores mostrados son correctos, hicimos consulta de investigaciones relacionadas a la capacidad de canal del estándar LTE. El profesor Zihuai Lin et all de la Universidad de Sídney, en Australia, publicó un artículo en la IEEE [17], donde se calcula la capacidad de canal ergódica<sup>1</sup> en el DL de LTE incluyendo el efecto de Single User (SU) y Multi-User (MU) MIMO. Sus parámetros incluyen arreglos de antenas pareados, 2x2, cuyas antenas de transmisión radiaban con igual potencia y la Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) de transmisión equivalente a 20 dB, obteniéndose el siguiente resultado:

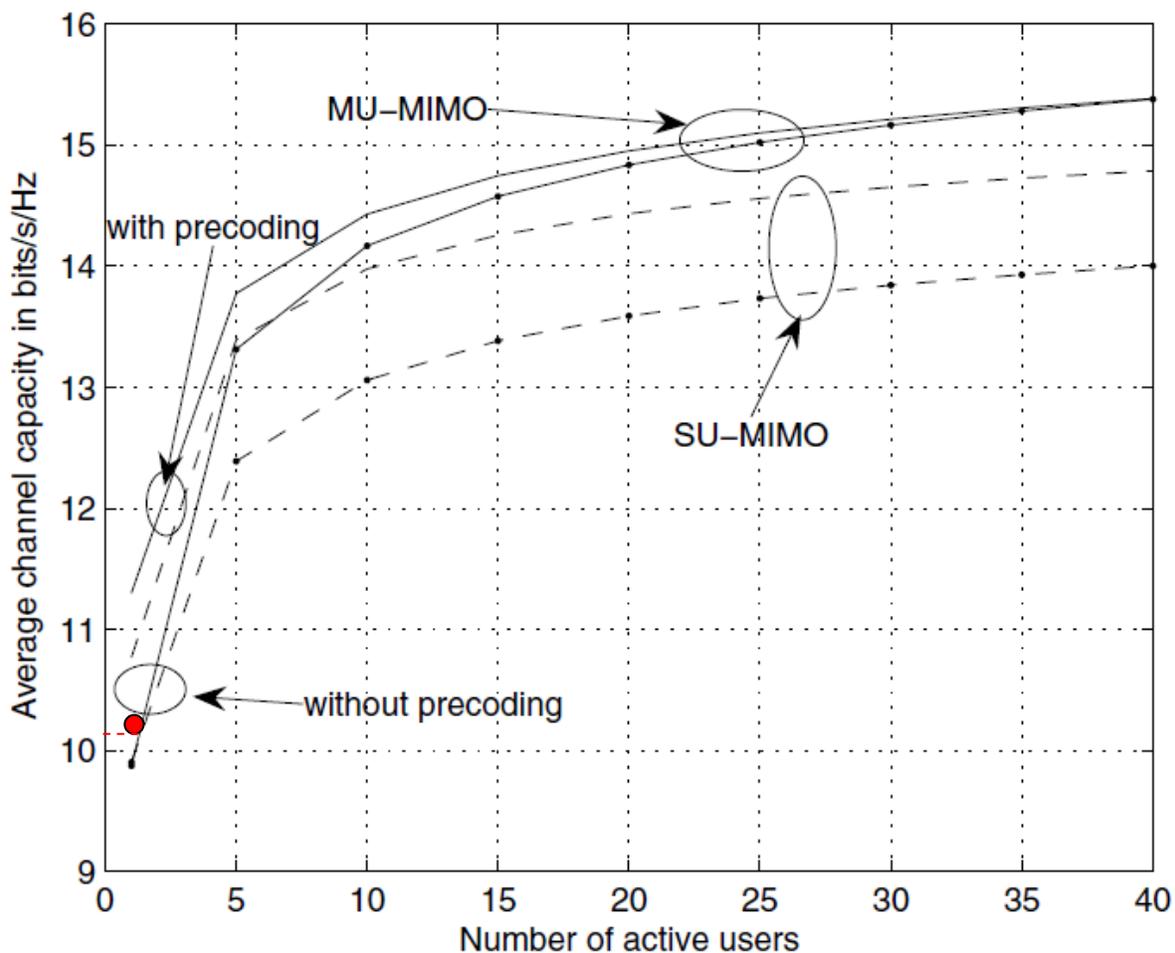


Figura 23. Capacidad de Canal Ergódica para multiusuario en esquemas SU y MU-MIMO con/sin precodificación lineal.

Fuente: extraído de [17].

<sup>1</sup> La capacidad de canal ergódica es definida como la capacidad de canal de Shannon instantánea que se espera bajo la suposición de que el proceso de desvanecimiento es blanco. [17]



Para la simulación mostrada en la figura 23, se consideran de 1 a 40 usuarios. El valor que nos interesa, para el escenario 1, está señalado con el punto rojo de la gráfica y denota la capacidad de canal promedio para 1 usuario.

Si asumimos que el caso más realista para el escenario 1 es un usuario caminando en medio del área de cobertura de una celda celular entonces tomaremos el valor de la potencia recibida en un punto de ese recorrido donde, según la figura 18,  $Z=0.007075$  W. Utilizando el M-File del Anexo B, generamos una gráfica para 2x2, sin precodificación lineal, obteniéndose la siguiente imagen:

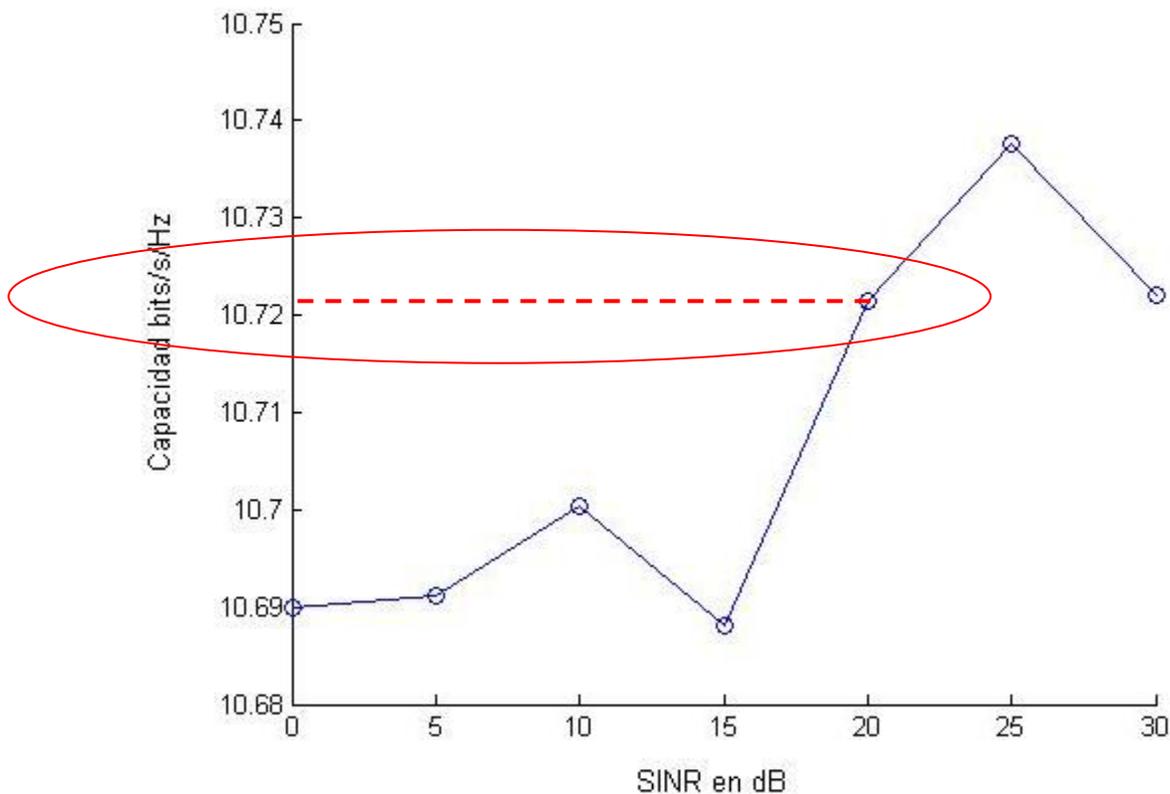


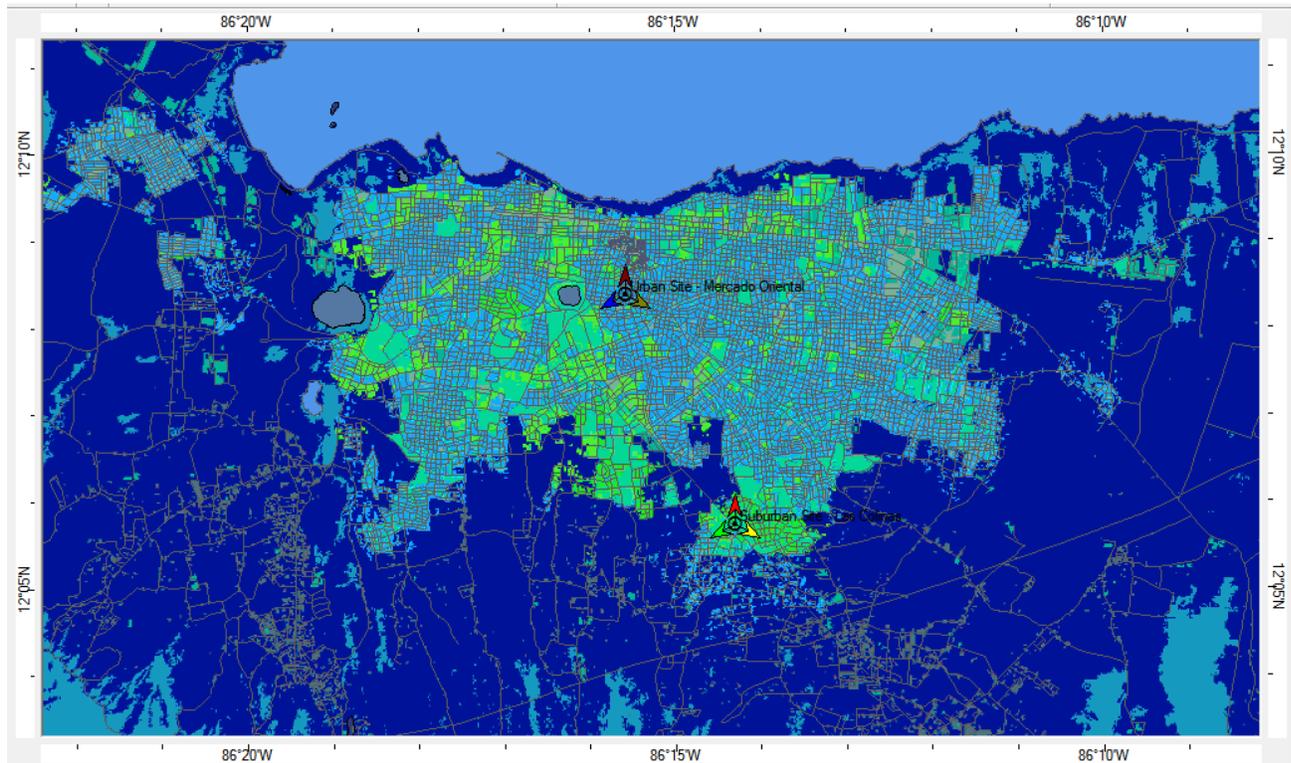
Figura 24. Capacidad de Canal de LTE con MIMO de arreglo 2x2.

Como vemos, la capacidad de canal promedio en la figura 24 es similar al de la figura 23 en el momento que la SINR llega a 20 dB. Por lo que podemos concluir que los valores obtenidos de esta simulación concuerdan con el desempeño teórico del estándar LTE bajo las condiciones del escenario 1.



### 3.2.3 Escenario 2

Para este escenario ubicamos dos sitios en diferentes zonas de Managua, seleccionándose un ambiente urbano y uno suburbano los cuales predominan en la capital. La siguiente figura muestra la ubicación de ambos sitios celulares.



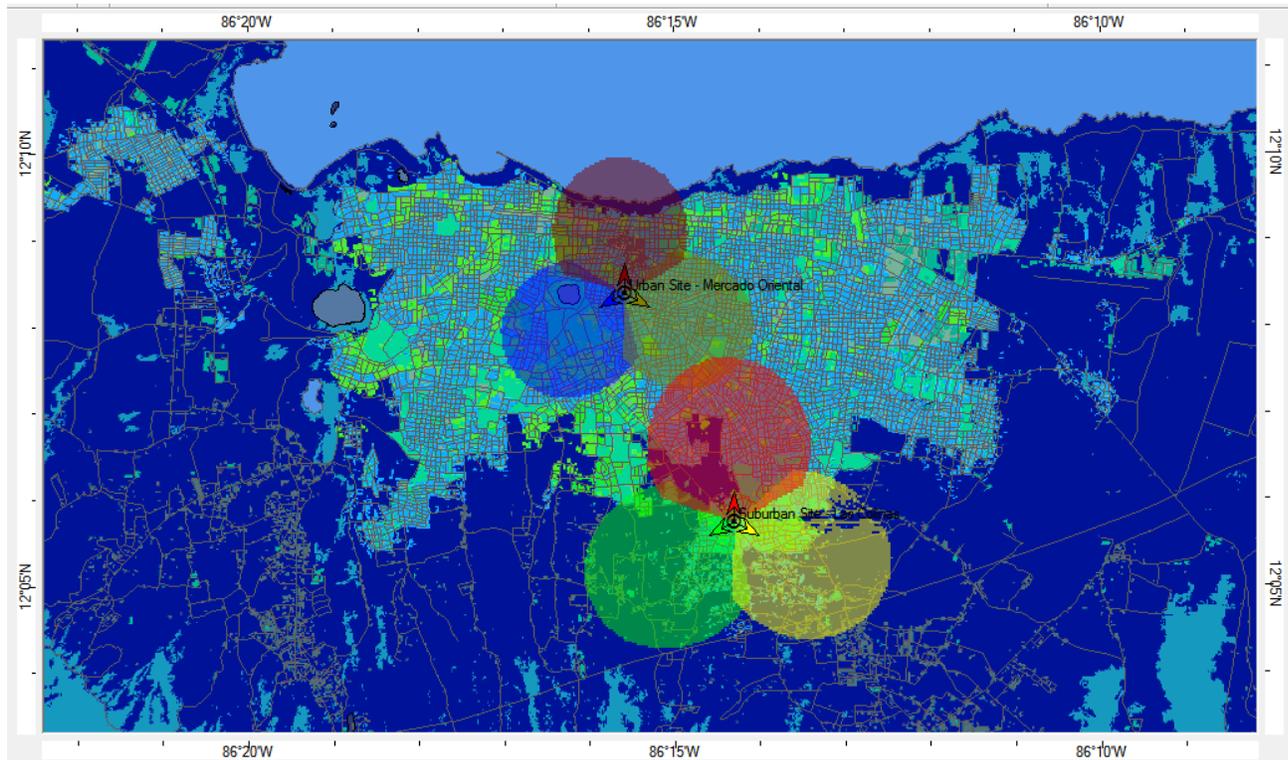
**Figura 25. Escenario 2 - Una Celda con Múltiples Usuarios.**

Estos sitios están ubicados en las coordenadas correspondientes a los que utiliza Yota de Nicaragua en el Mercado Oriental (urbano) y las Colinas (suburbano). Cada sitio será estudiado individualmente para cumplir con el requerimiento de una celda con múltiples usuarios. Para realizar una simulación de Monte Carlo y asignar una carga de usuario a cada eNodeB se requiere seguir los siguientes pasos.



### *Generar una Predicción de Coverage by Transmitter.*

Permite predecir las zonas de cobertura por transmisor analizando para cada píxel del mapa el mejor transmisor. La figura 26 muestra el resultado de esta predicción.



**Figura 26. Predicción de Cobertura por Transmisores.**

### *Generar un mapa de tráfico.*

Debido a que ya contamos con una predicción de cobertura entonces podemos proveer datos a la herramienta de tráfico de ATOLL®.

El software provee 3 tipos de mapas de tráfico para proyectos en GSM/GPRS/EDGE que son válidos para LTE:

- Mapa de tráfico por sector.
- Mapa de tráfico por perfil de usuario.
- Mapa de tráfico por densidad (número de usuarios por km<sup>2</sup>).

Para esta investigación, utilizaremos mapas de tráfico por perfil de usuarios. Dentro de esta opción, existen dos parámetros de mapa: basados en el ambiente del perfil de usuario y basado en densidades de perfil de usuarios tal como se puede ver en la siguiente ilustración.

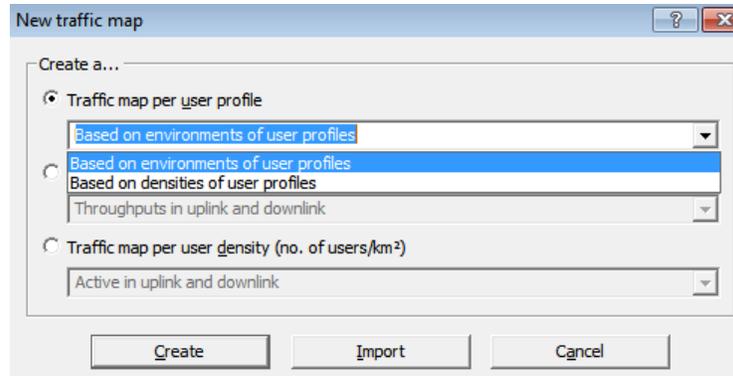


Figura 27. Configuración de Mapas de Tráfico.

Utilizamos la primera opción mencionada ya que los casos propuestos para el escenario 2 se distinguen por el ambiente (urbano y suburbano) y este tipo de mapa de tráfico permite dibujar un polígono para delimitar la zona de interés viéndose el siguiente resultado.

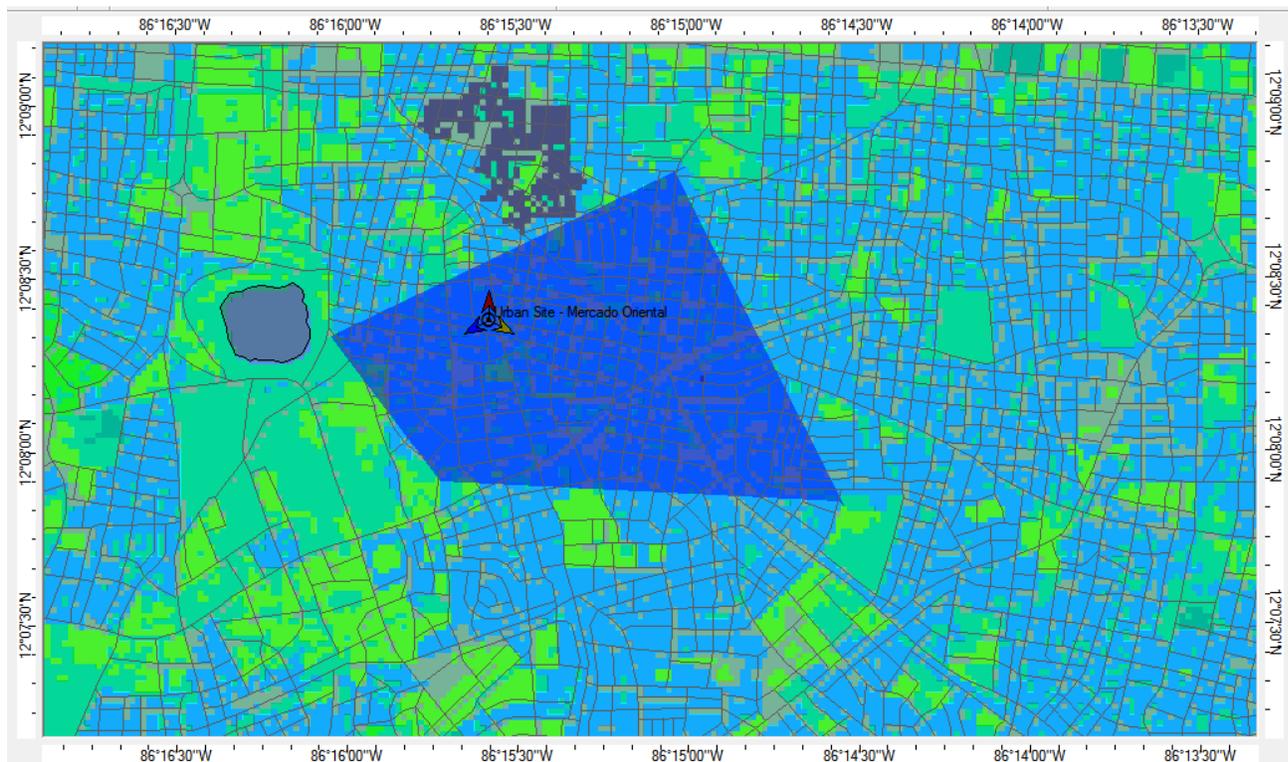


Figura 28. Mapa de Tráfico. Sitio Urbano - Mercado Oriental.

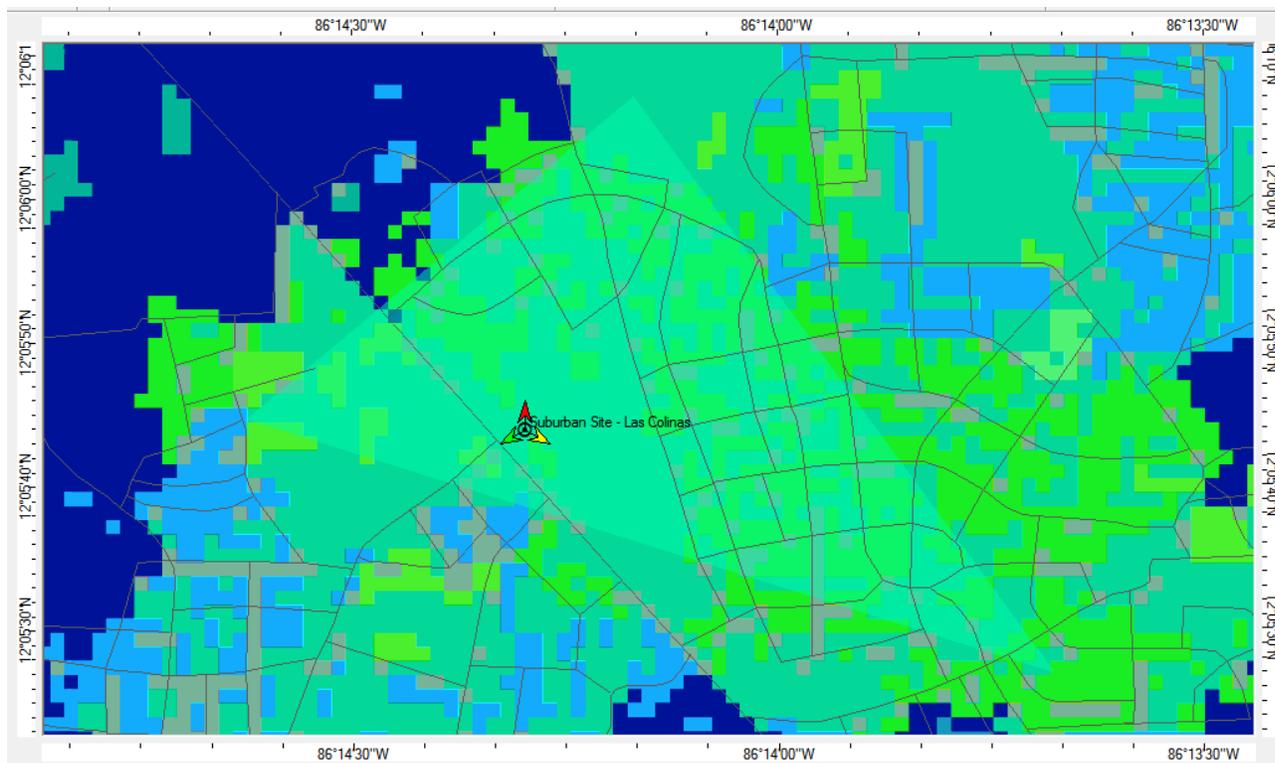


Figura 29. Mapa de Tráfico. Sitio Suburbano - Las Colinas.

Este tipo de mapa de tráfico que ofrece ATOLL® es conveniente para los fines de esta monografía debido a que no requiere datos de tráfico reales y permite una aproximación de la realidad a través de una distribución de Poisson. Cabe aclarar que el Scope de la investigación radica en el estudio de la Interfaz de Aire y no en análisis de tráfico por lo que la validez estadística que proporciona ATOLL® es suficiente para fines de obtener los resultados deseados.

### *Realizar simulación de Monte Carlo*

Con los datos obtenidos de los pasos anteriores llegamos al último paso que es en sí asignar la carga de usuarios. Para poder hacer el análisis individual de cada eNB, declaramos en propiedades de la simulación el mapa de tráfico que usaremos como fuente de datos para la simulación como se muestra en la siguiente figura.

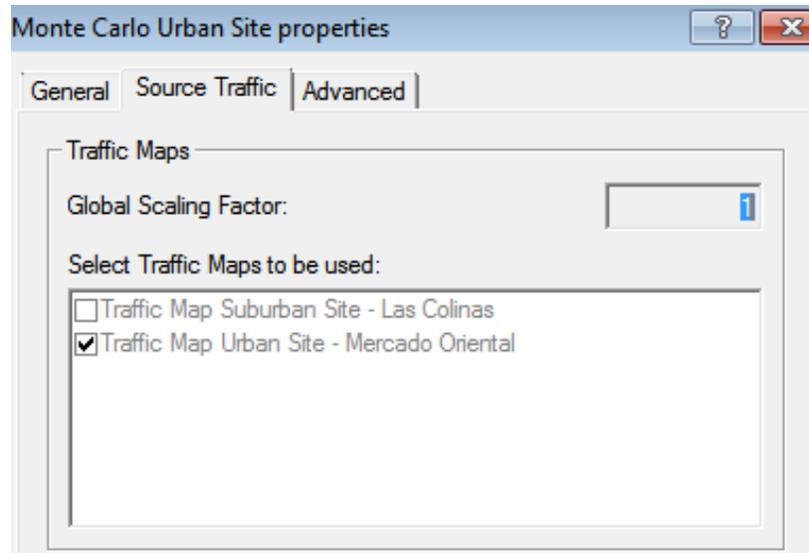


Figura 30. Configuración de la fuente de Tráfico para Simulación Monte Carlo.

Luego de correr la simulación los espacios de los polígonos se llenan con usuarios creando el siguiente resultado que se muestra en la figura 31.

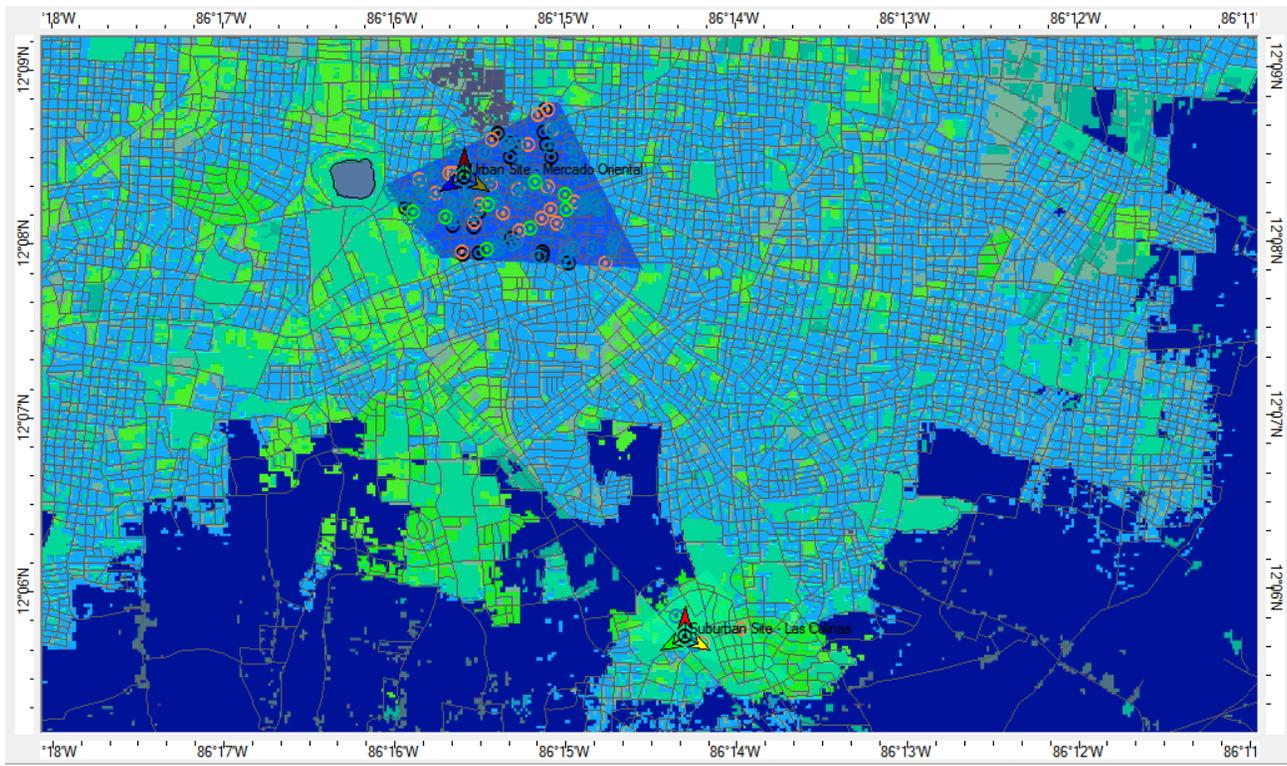


Figura 31. Simulaciones Monte Carlo. Zonas urbana y suburbana.



### 3.2.4 Escenario 3

Debido a que el escenario exige un ambiente multi-celda, es necesario usar un *cellfile*. Utilizando el algoritmo en la figura 9, creamos un *cellfile* que podemos importar desde ATOLL®. El resultado se observa en la figura 32.

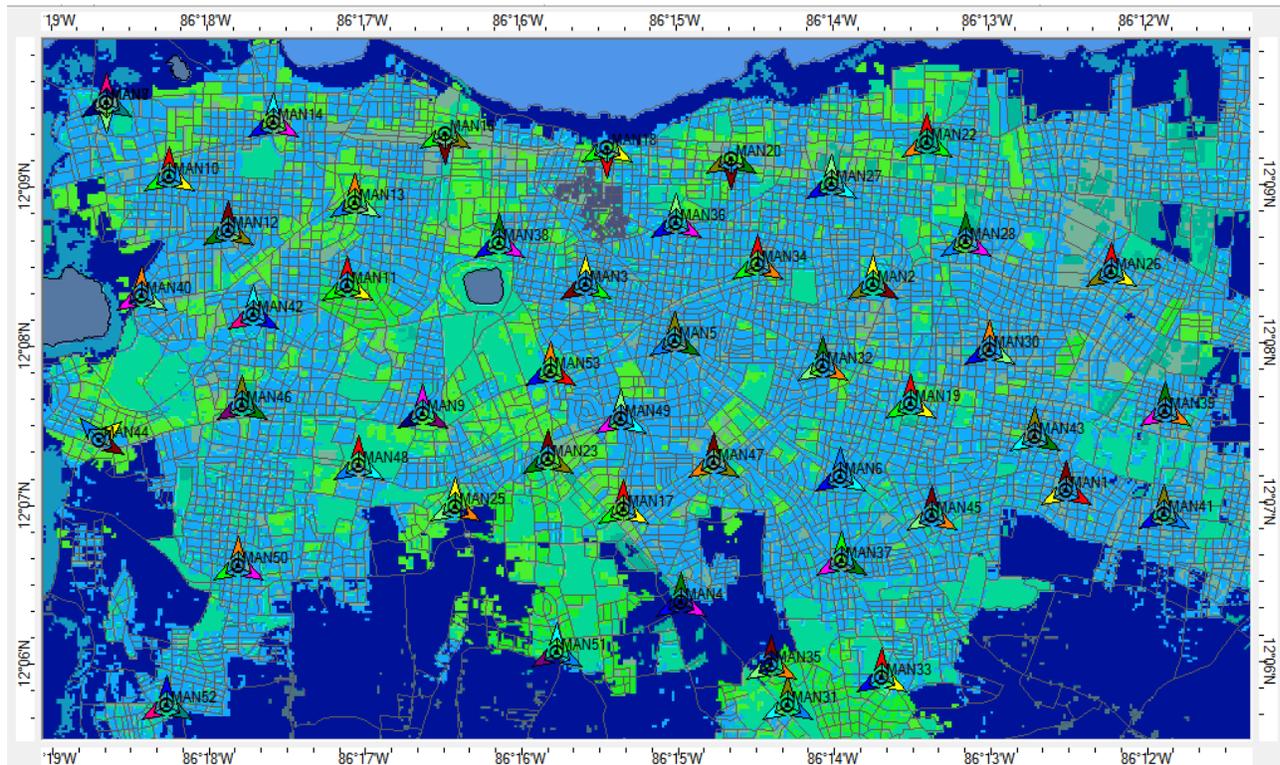


Figura 32. Mapa de despliegue de celdas usando el *cellfile*.

Para obtener los resultados de desempeño de la red que necesitamos, utilizaremos nuevamente la simulación de Monte Carlo y seguiremos los pasos realizados para el escenario 2.

#### *Generar una Predicción de Coverage by Transmitter.*

Utilizando la herramienta de predicción de ATOLL®, obtenemos la cobertura por transmisión que se aprecia en la figura 33.

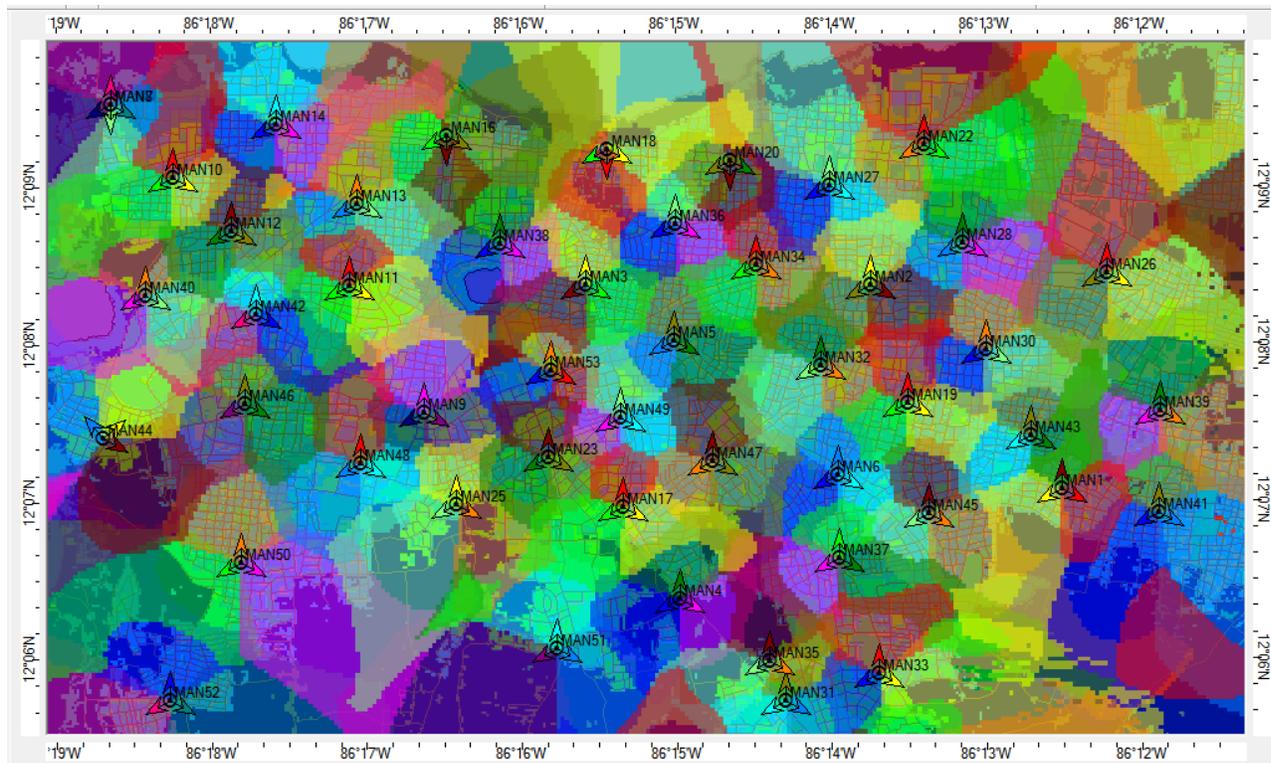


Figura 33. Predicción de Cobertura por Transmisores.

### *Generar un mapa de tráfico.*

Utilizando el mismo tipo de mapa usado en el escenario 2, trazamos un polígono en el mapa de la figura 32. La intención con el polígono es que cubra la ruta que se definió en el Capítulo 2 (véase figura 11) para la realización del Drive Test con Yota de Nicaragua, el cual corresponde a una zona urbana. De este modo se podrá hacer una comparación entre la simulación y los resultados del Drive Test, posteriormente. La figura 34 muestra el polígono del mapa de tráfico.

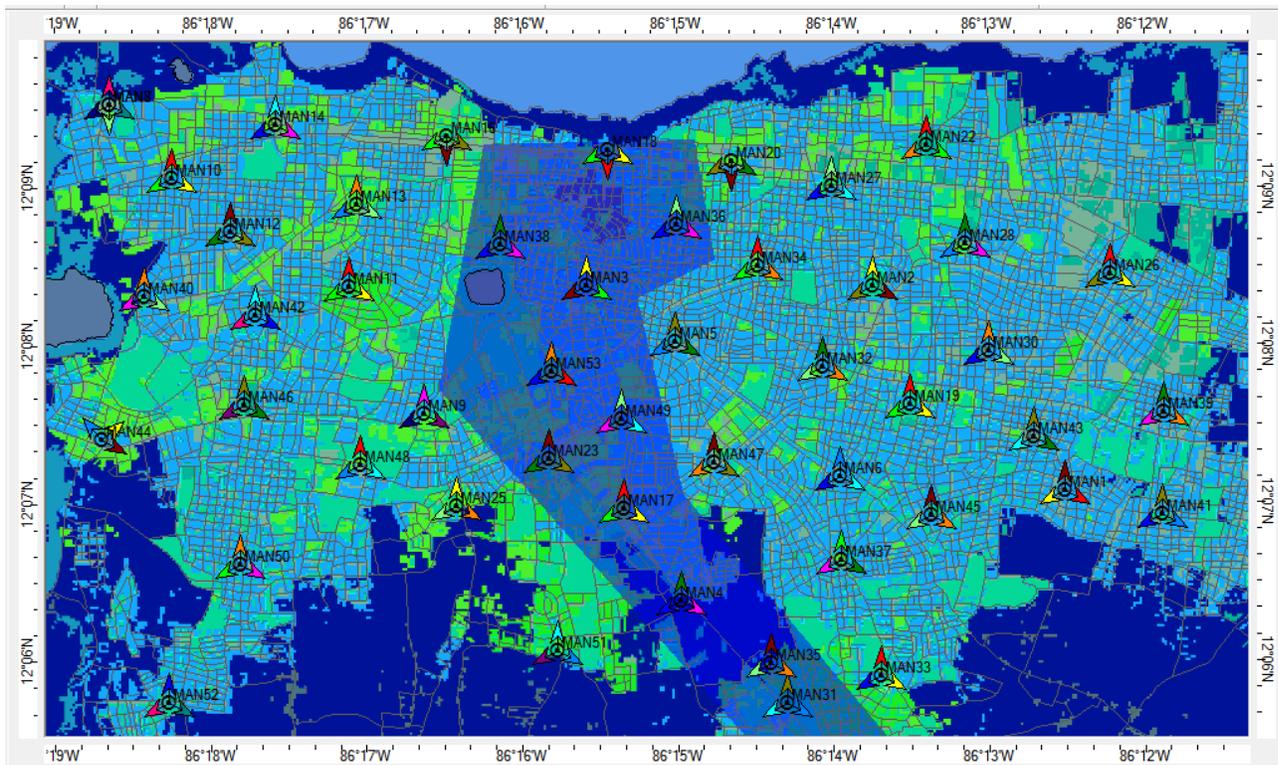


Figura 34. Mapa de Tráfico. Zona Urbana - Ruta de Drive Test.

### *Realizar simulación de Monte Carlo*

Usando el mapa de tráfico como fuente de datos, generamos la simulación de Monte Carlo como se muestra en la figura 35.

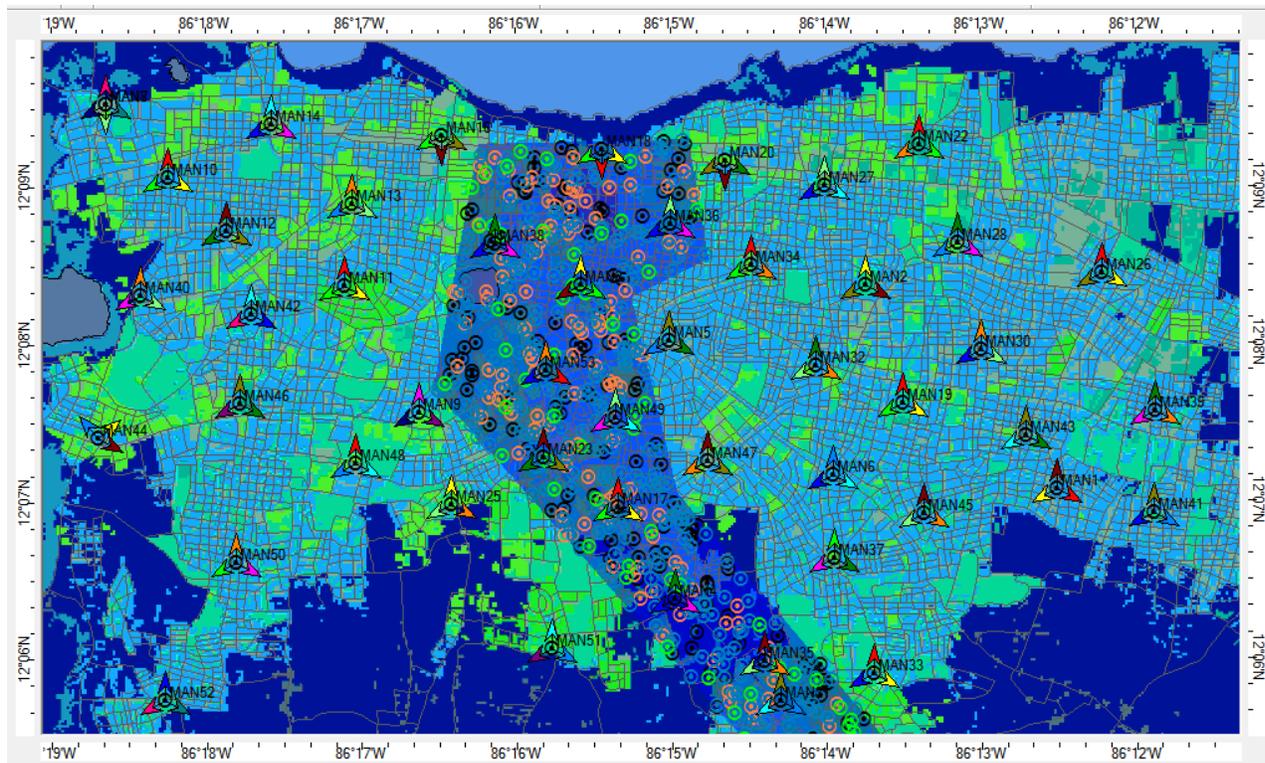


Figura 35. . Simulación Monte Carlo. Zona urbana - Ruta de Drive Test.

### 3.3 Resultados de Drive Test

Los resultados incluyen los niveles de Carrier to Interference + Noise Ratio (CINR), Relative Signal Strength Indicator (RSSI), Transmit Power level (TP) y Download Throughput (DT). Los gráficos generados de estos indicadores se pueden apreciar en el Anexo C.

### 3.4 Comparación entre Mediciones y Simulaciones.

Se puede hacer una comparación entre el Escenario 2 y el RSSI obtenido de los Drive Test. Esto es debido a que el Drive Test simula un usuario haciendo el recorrido en múltiples celdas. Tomando como referencia una celda del recorrido comparamos los niveles de RSSI de la muestra y de la simulación.

En ATOLL®, existe una herramienta llamada Point Analysis Tool la cual permite predecir, en cualquier punto del mapa, el perfil entre un transmisor de referencia y un receptor. [18]

La figura 36 muestra el análisis punto a punto entre el transmisor del Sitio Urbano – Mercado Oriental y uno de los usuarios generados aleatoriamente durante la simulación de Monte Carlo.

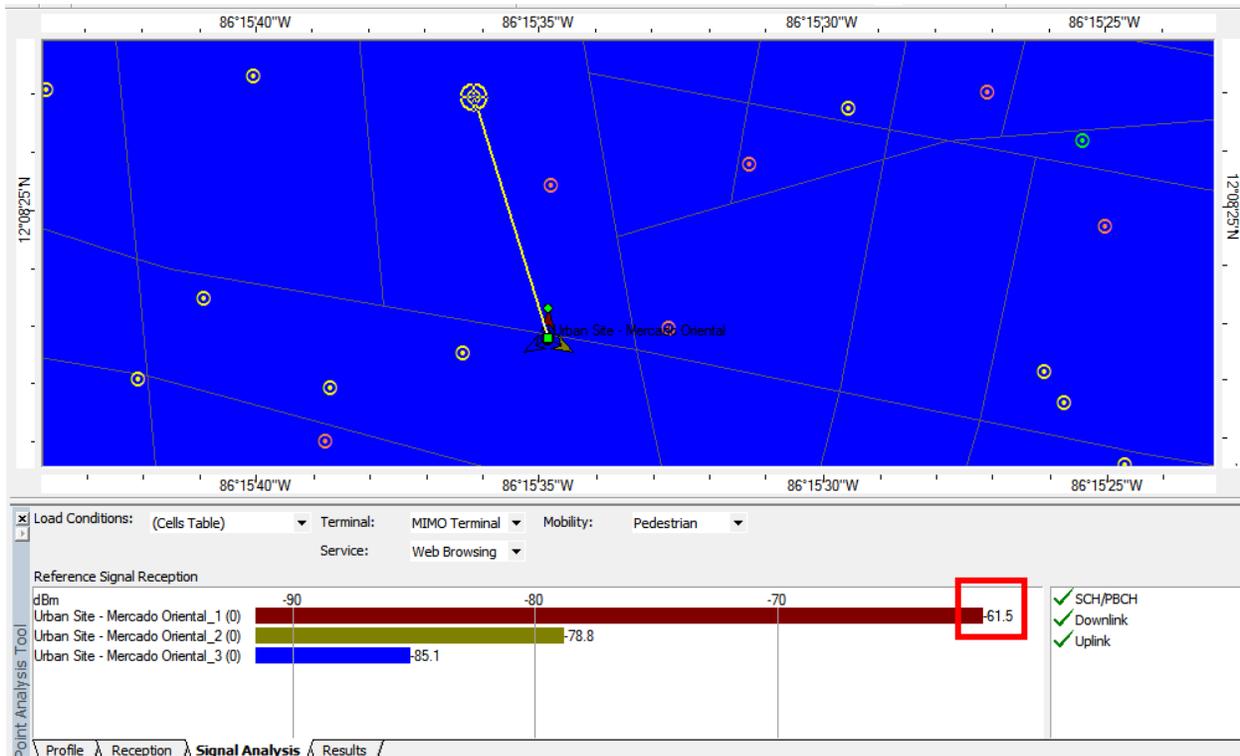


Figura 36. Perfil del enlace de Sitio Urbano usando Point Analysis Tool.

Tomando esta misma celda del mercado oriental de los resultados del Drive Test comparamos los niveles de RSSI para un punto similar al mercado en la simulación. La figura 37 muestra los niveles de RSSI en esa zona y el punto rojo señala un lugar cercano al usuario aleatorio en ATOLL®. La tabla contiene el rango de niveles que fueron captados durante el Drive Test. Se puede apreciar que los niveles son muy similares por lo que el **RSSI coincide en ambos casos.**

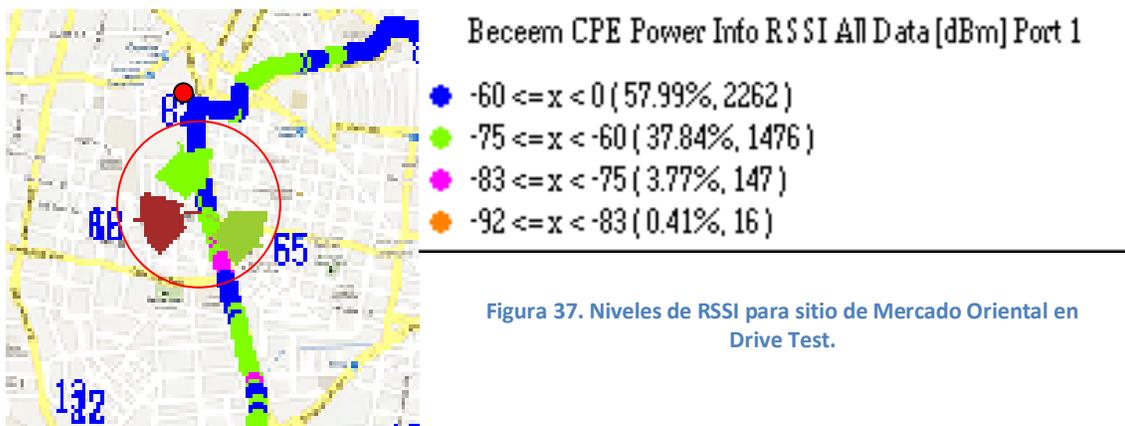


Figura 37. Niveles de RSSI para sitio de Mercado Oriental en Drive Test.



Repetimos el procedimiento para el Sitio Suburbano – Las Colinas. La figura 38 muestra el análisis de puntos entre el transmisor y un usuario que viene cerca de la carretera.

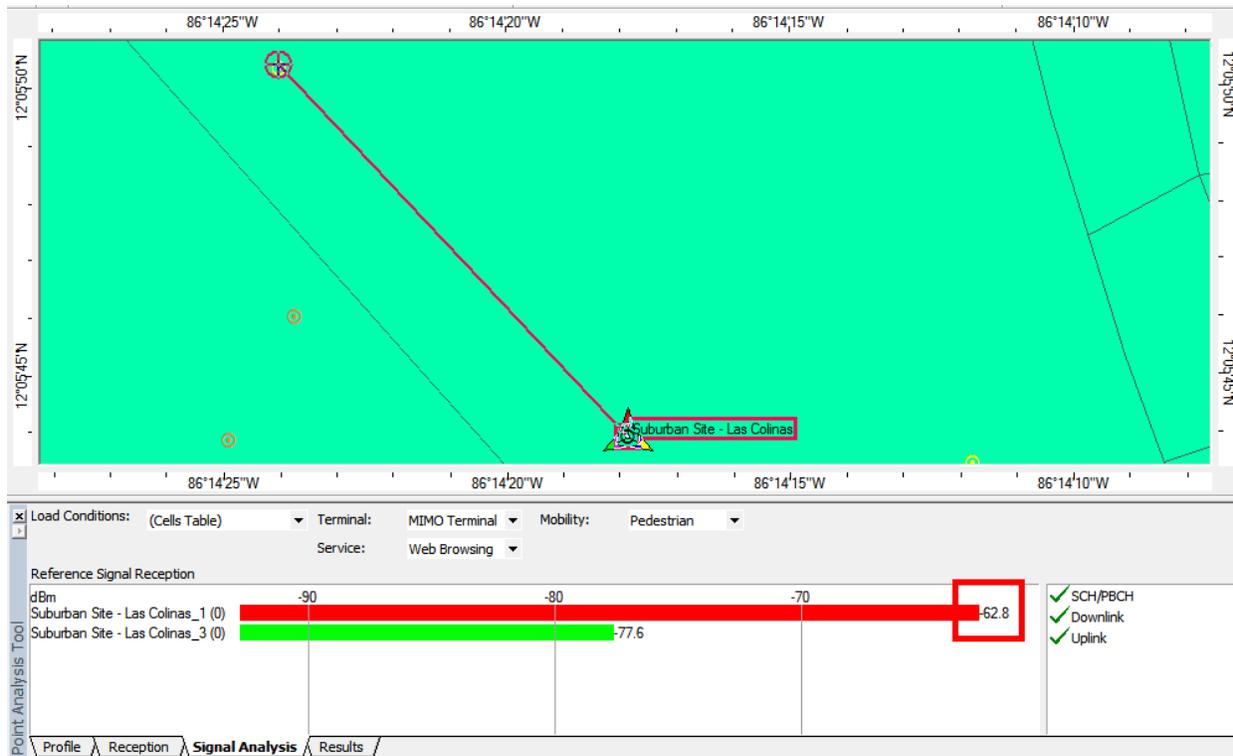


Figura 38. Perfil del enlace de Sitio Suburbano usando Point Analysis Tool.

Referenciamos los valores del Drive Test en el sitio de las Colinas. Como se puede apreciar en la figura 39, los niveles de RSSI vuelven a coincidir con la simulación.

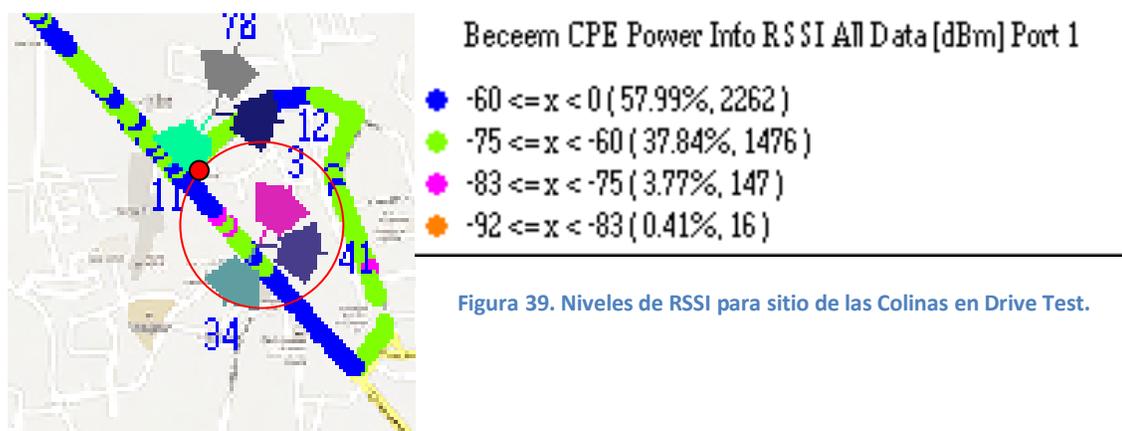


Figura 39. Niveles de RSSI para sitio de las Colinas en Drive Test.



Para el Escenario 3, hemos propuesto una serie de Indicadores Claves de Desempeño (KPI por sus siglas en inglés). Los KPI pueden asociarse a una variedad de parámetros tales como calidad de: Cobertura, Terminal, Disponibilidad (Accesibilidad), Fiabilidad, Fidelidad, etc. [19]

Sin embargo, para nuestro caso en LTE, utilizaremos dos indicadores: Accesibilidad y Rendimiento. Dado que nuestra red está en fase de diseño, los KPI propuestos están concebidos para una evaluación preliminar debido a que requeriría una cierta cantidad de pruebas de campo o Drive Test para dar una aceptación final de la red lo cual incluye corregir problemas como los tilt de las antenas o, inclusive, reubicar un sitio. [19]

Para dar validez estadística a los resultados del Escenario 3, se han hecho varias repeticiones de la simulación de Monte Carlo a fin de dar un promedio de los usuarios que tienen acceso y el desempeño efectivo de la red. La tabla 6 muestra los parámetros utilizados para proponer los KPI.

Parámetro	Restricción	Comentario
Tipo de Servicio	Web Browsing	Servicio que provee Yota
Tipo de UE	Categoría 2-4	MIMO 2x2
Mobility	Caminata	No se considera handover
Repeticiones de Simulación	6	
Carga de usuarios en el DL (%)	100	Peor de los casos
Repeticiones de Drive Test	3	Previo acuerdo con Yota

Tabla 6. Parámetros considerados para evaluar los KPI.

Se compararon los KPI de las simulaciones con los KPI de Yota basados en los Drive Test realizados. La tabla 7 detalla la propuesta de KPI para esta monografía.

KPI	LTE 700 MHz	Yota	Comentarios
Accesibilidad (%)	77.70	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>LTE700: Muestra en base a 595.67 usuarios.</li> <li>Yota: Muestra en base a 1 modem Yota durante 3 recorridos.</li> </ul>
Rendimiento (Mbps)	15.36	$2.048 \leq x < 4.096$	<ul style="list-style-type: none"> <li>LTE700: Con una SD de 1.15.</li> <li>Yota: Durante un promedio de 45.53% de los 3 recorridos.</li> </ul>

Tabla 7. KPI evaluados para Escenario 3 y Drive Test con Yota.



### 3.5 Discusión de Resultados

Observamos que el rendimiento de la red LTE es mayor que el actual WiMAX que hay en el país para el servicio de Web Browsing y tienen niveles de RSSI similares para las zonas urbanas y suburbanas de Managua. Estos resultados se aprecian en la tabla 8.

Parámetro	Ambiente	LTE 700 MHz	Yota
RSSI (dBm)	Urbano	-61.5	$-60 \leq x < 0$
	Rural	-62.8	$-75 \leq x < -60$

Tabla 8. Comparación de RSSI - LTE 700 MHz vs Yota.

Basándonos en los KPI propuestos en la tabla 7, podemos afirmar que la tecnología LTE tiene las condiciones necesarias para suplir la demanda de datos y de movilidad que existe en Nicaragua. De los KPI también podemos observar que algunos niveles como Accesibilidad posiblemente son muy bajos en comparación a la realidad de una red en operación, sin embargo, debemos considerar que el estudio realizado está basado sin optimizar por lo que no funciona a plena capacidad.

Es necesario revisar la Interferencia Cocanal y Adyacente en caso de tener una banda vecina en TDD. Los estudios realizados y discutidos en foros técnicos internacionales demuestran que se requiere una banda de guarda mínima de 5 MHz para hacer frente a los problemas de interferencia entre sistemas TDD y FDD que operen en bandas adyacentes en la misma zona geográfica. [22]

En una entrevista en Yota con el Gerente Técnico, Ing. Dmitry Yerankevich, nos mencionaba que la demanda de datos en Nicaragua ***“es alta. Se corrigió el plan de desarrollo dado que las proyecciones se quedaron muy abajo de la demanda real. Las zonas pobres tienen alta demanda.”*** De acuerdo al Ingeniero Yerankevich, aún faltan sectores del mercado nicaragüense que no han sido suplidas sus demandas de servicios de comunicación móviles, y podría llegar a ser una necesidad la implementación de una nueva tecnología.

Sin embargo, es necesario considerar el poder adquisitivo de la población nicaragüense el cual haría incierta la rentabilidad de una inversión de esta envergadura para cualquier operador de telefonía celular. De momento, se puede decir que la demanda de servicios basados en IP es alta pero es discutible si el mercado nicaragüense está preparado para utilizar esa clase de tecnología.



## Capítulo 4

### 4. Conclusiones y Recomendaciones

Comienza con el planteamiento de las conclusiones tomando en cuenta el cumplimiento de los objetivos y responder a la pregunta del problema propuesto.

Finaliza con recomendaciones sobre algunos temas relacionados con esta monografía que no fueron abordados y podrían servir de material para futuros trabajos de investigación.



## 4.1 Conclusiones

En conclusión, hemos analizado los parámetros del estándar LTE conforme a la propuesta del Release 8 elaborado por la organización 3GPP.

A través del uso de MATLAB®, hemos podido comprobar la capacidad de canal de LTE, con la realización de simulaciones, y comparamos los resultados con estudios publicados previamente acerca de los parámetros de la tecnología LTE. Los valores obtenidos en esta prueba coincidieron con los datos recogidos de dichas investigaciones.

Utilizando el software ATOLL® determinamos el desempeño de una red LTE bajo las condiciones encontradas en Nicaragua tomando como referencia la ciudad de Managua, debido a que presenta mayor cantidad de zonas urbanas que demandan tráfico de voz y de datos móviles. Por medio de la creación de escenarios para los ambientes urbanos y suburbanos de Managua, obtuvimos una instantánea del desempeño de LTE y lo comparamos con mediciones de campo (Drive Test) de la red de Yota de Nicaragua, empresa que utiliza WiMAX 802.16e para brindar servicios de datos móviles. Los resultados demuestran que la tecnología LTE tiene un mejor desempeño en velocidad de datos, que puede transmitirse en el DL, para Web Browsing.

Fue factible diseñar una red LTE basándonos en los puntos de red existentes de Yota usando la técnica de coubicación. En Nicaragua se aprobó, el pasado 27 de Junio de 2013, la ley #843 la cual permite y promueve la coubicación para contrarrestar los problemas paisajísticos que conlleva la construcción de un sitio celular.

La red propuesta utiliza la parte baja de la banda de 700 MHz, que aún no está asignada, y que fue aprobada por el Instituto Nicaragüense de Telecomunicaciones y Correos, Telcor, en el acuerdo administrativo 007-2005 (*Véase Anexo D*).

Finalmente, discutimos si la tecnología LTE es una solución para la demanda de servicios de voz y datos que deben satisfacer los operadores de celular actualmente en Nicaragua. Podemos concluir que la respuesta es afirmativa debido a las muchas tendencias, nacionales e internacionales, que van rumbo a la implementación de LTE para brindar servicios móviles. Un ejemplo interesante es la decisión de las oficinas centrales de Yota, en Rusia, acerca de cambiar la tendencia de WiMAX e inclinarse por la propuesta de LTE la cual opera comercialmente en Rusia hoy en día.



## 4.2 Recomendaciones

El tema de esta monografía está limitado al análisis de la RAN, específicamente el DL. También realizamos una propuesta de diseño y planificación RF así como indicadores de desempeño (KPI), preliminares dado que la tecnología LTE aún no se comercializa en Nicaragua.

En relación al tema de LTE en nuestro país, se pueden ahondar en los siguientes aspectos los cuales complementarían los conocimientos adquiridos de esta monografía. A manera de ejemplo recomendamos los siguientes:

1. Análisis del OFDMA como esquema de acceso múltiple en LTE.
2. Análisis del SAE y sus diferentes capas e interfaces.
3. Simulación de la movilidad en LTE incluyendo el efecto del Handoff/Handover.
4. Análisis de desempeño de una Red LTE usando la técnica de TDD y compararlo con FDD.
5. Análisis de desempeño de LTE basado en el tráfico real de voz y datos móviles en Nicaragua.
6. Estudio experimental de una red LTE Advanced (Rel. 10 de 3GPP).
7. Análisis de Cobertura de Interiores de LTE.

Cabe destacar que el uso de la herramienta ATOLL® será de mucha utilidad, en algunos casos indispensable, para acometer los temas propuestos por lo que recomendamos que la Facultad de Electrotecnia y Computación (FEC) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) incorpore como parte de su programa académico la enseñanza de este software para las carreras afines a las telecomunicaciones.

Adicionalmente, existen muchos otros aspectos de índole técnico-económica implicados en el despliegue de una red sin importar la tecnología que se utilice, por ejemplo:

1. Construcción de sitios.
2. Instalación de un core o núcleo de red.
3. Initial & fine tuning.
4. Enlace entre backbone y backhaul.

Finalmente, otro aspecto que recomendamos está relacionado con una red funcional la cual requiere de otra serie de actividades, tales como:

1. Operación y mantenimiento de red.
2. Optimización de red.
3. Benchmarking.



## 5. Bibliografía

- [1] Monografía. Guinand Salas, Cristina Eugenia. Tutor: Anna Umbert Juliana (2, 2012). PLANIFICACIÓN DE UNA RED LTE CON LA HERRAMIENTA ATOLL Y ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS ESTRATEGIAS DE PACKET SCHEDULING. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
- [2] Dahlman, E., Parkvall, S. & Skold, J. (2011). 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Published by Elsevier Ltd.
- [3] Motorola. TECHNICAL WHITE PAPER: Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview
- [4] Blajic, T., Nogulic, D. & Druzijanic, M. Artículo: Latency Improvements in 3G Long Term Evolution. Mobile Solutions Ericsson Nikola Tesla d.d.
- [5] Zyren, Jim. (2007). White Paper: Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer. Dr. Wes McCoy, Technical Editor. Freescale Semiconductor, Inc.
- [6] Referencia web: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [7] Referencia web: <http://www.forsk.com/atoll/>
- [8] Giuseppe Piro, Student Member, IEEE, Luigi Alfredo Grieco, Member, IEEE, Gennaro Boggia, Senior Member, IEEE, Francesco Capozzi, Student Member, IEEE, and Pietro Camarda (2011). Artículo: Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 60, NO. 2.
- [9] Referencia web: <http://www.telecomhall.com/es/que-es-drive-test-testing-de-rf.aspx>
- [10] Referencia web: [http://www.tutorialspoint.com/lte/lte\\_network\\_architecture.htm](http://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm)
- [11] Referencia web: <http://www.3gpp.org/LTE>
- [12] Referencia web: <http://www.nt.tuwien.ac.at/about-us/staff/josep-colom-ikuno/lte-simulators/>
- [13] Apuntes de Clases. Asignatura: Técnicas de Alta Frecuencia. Instructor: Israel M. Zamora, MScTelecom Management. Profesor Titular, Departamento de Sistemas Digitales y Telecomunicaciones. Universidad Nacional de Ingeniería. Impartido en 2011.



- [14] M.Suneetha Rani, Subrahmanyam VVRK Behara, K.Suresh. Department of ECE, Chaitanya Engineering College Visakhapatnam, A.P. INDIA. Artículo: Comparison of Standard Propagation Model (SPM) and Stanford University Interim (SUI) Radio Propagation Models for Long Term Evolution (LTE). ISSN: 2278-7844. © 2012 IJAIR.
- [15] Referencia web: [www.kathrein-scala.com/](http://www.kathrein-scala.com/)
- [16] Referencia web:  
<http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/9e314815a08d4a6206257265005d21f9/f6f12a3dcf40a5e206257bc200700962?OpenDocument>
- [17] Zihuai Lin, School of Electrical and Information Engineering, University of Sydney, Branka Vucetic, School of Electrical and Information Engineering, University of Sydney and Jian Mao, SR Telecom. Artículo: Ergodic Capacity of LTE Downlink Multiuser MIMO Systems. ©2008 ICC IEEE.
- [18] ATOLL® RF Planning & Optimization Software. User Manual version 2.8.0, Forsk.
- [19] Referencia web: <http://www.teletopix.org/4g-lte/how-and-which-kpi-to-check-before-and-after-lte-launch/>
- [20] Estudio y Simulación Básica de los Sistemas de Comunicaciones Tipo MIMO Usando MATLAB®. Autores: Ivania Zelaya Urbina y Gelman Cerda Urbina. Tutor: Dr. Marvin Arias Olivas. (2012).
- [21] TELCOR. Acuerdo Administrativo # 007-2005. Emitido por: Joel Martin Gutiérrez González. Fecha de Emisión y entrada en vigencia: Lunes, 10 de Enero de 2005. Validez actual: Si. Nombre del archivo: Acuerdo Administrativo No. 007-2005.pdf
- [22] GSMA™. La Banda de 2,6GHz: Oportunidad para lograr una Banda Ancha Móvil Global.



## Anexos

Anexo A: M-File para generación de una celda celular y un usuario aleatorio.

Anexo B: M-File para simular el efecto de MIMO en la capacidad de canal en LTE.

Anexo C: Gráficas mostrando los resultados del Drive Test con Yota mostrando los niveles de RSSI y DT.

Anexo D: Acuerdo Administrativo 007-2005 de Telcor para la parte alta y baja de la banda de 700 MHz.



## Anexo A. M-File para generación de una celda celular y un usuario aleatorio.

```
function [S_total,S,p2]= radiacionLTE()
clear All
clear Global
clc
Went=input('Introduzca la potencia de transmisión (W): ');
q=input('Introduzca el radio de cobertura (m2): ');
n=input('Introduzca el número de radio transmisores por arreglo: ');
N=input('Introduzca el número de antenas por arreglo: ');
h=input('Introduzca la alturas de las antenas (m): ');
h2=input('Introduzca la altura promedio de una persona (m): ');
a=input('Introduzca la banda de operacion en LTE (MHZ): ');
T=input('Introduzca el Tilt de la Antena (grados): ');
G=input('Introduzca la Ganancia de la Antena (dBi): ');
B=input('Introduzca el beamwidth de la Antena (grados): ');
%BW=input('Introduzca el bandwidth asignado (MHZ): ');
Anzahl=input('Introduzca el numero de pasos del camino aleatorio: ');
W=input('Introduzca la banda para downlink en LTE (MHZ): ');
k=input('Introduzca el numero de repeticiones: ');
%ymax=input('Introduzca el axis y: ');
%xmin=input('Introduzca el axis xm: ');
%ymin=input('Introduzca el axis ym: ');

p=zeros(1,k);
for j=1:k

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Escoge la antena más adecuada dados los parámetros ingresados;
%Obtiene el dato de la funcion 'antena' y lo almacena en la variable b;

b=antena; %Antena LTE a utilizar
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Definimos el radio.
r=0.1:q;
r=r';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
close all; %Cerramos todas las figuras

Gt=zeros(N,361); %Declaramos la variable Gt con N*361 ceros
THETA=2*pi*(0:360)/360;
%rho2=b-min(b);

%for i=1:N
    %THETA2=(THETA+i*360/N);
    %polar(THETA+i*2*pi/N,rho2')
%end

hold off
grid
c=[0 0];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
X=r*cos(THETA)+ c(1); %Valores de X para pasar de polar a rectangular
Y=r*sin(THETA)+ c(2); %Valores de Y para pasar de polar a rectangular
```



```
EIRPdb=zeros(N,361); %Declaramos EIRPdb con N*361 ceros
EIRP_W=zeros(N,361); %Declaramos EIRP_W con N*361 ceros

S=zeros(size(r,1),361,N); %Declaramos S con el tamaño de r por 361 por N
ceros
S_total=zeros(size(r,1),361); %Declaramos S_total con el tamaño de r por 361
ceros

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Iteracion de las antenas para hacer el arreglo.
for i=1:N
Gt(i,:)=circshift(b,-i*360/N); %Obtiene los valores de rho, los rota 120
grados y los almacena en Gt
Wentdb =10*log10(n*N*Went); %Potencia de entrada del transmisor en DB.
EIRPdb(i,:)=Wentdb+Gt(i,:); %Potencia radiada isotrópica equivalente en DB.
EIRP_W(i,:)=10.^(EIRPdb(i,:)/10); %Potencia radiada isotrópica equivalente en
W.
hprima=h-h2; % h es altura de la antena, hprima=altura de la Ax menos
estatura máxima humana (2m)
theta=atan(hprima./r); % theta es el ángulo con respecto a la altura de la
antena
f_theta=((cos((pi/2)*sin(theta))./cos(theta)).^2); % f_theta es
S(:, :, i)=(((2.56/(4*pi)).*f_theta./(hprima^2+r.^2))*EIRP_W(i,:)); % Guardamos
la densidad de potencia de cada antena %S es la densidad de potencia a nivel
del suelo (W/m)
%figure(i+1); % En la figura i (ej. 1)
%mesh(X,Y,S(:, :, i)); % Graficamos el mesh de la densidad de potencia de i
(ej. 1)
S_total=S_total+S(:, :, i); % Sumamos las densidades de potencia de cada antena
end
%figure(i+2); %en la figura i+1 (ej. 2)
%figure (2);
mesh(X,Y,S_total); % Graficamos la densidad de potencia total.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Random Walk
figure(2);
% Parametros por defecto
if (nargin < 4)
Driftx = 0;
Drifty = 0;
end
if (nargin < 2)
% Pasos = 2;
Weite = 10;
end

clf;
axis square; axis equal;
hold on;
Position = zeros(2, Anzahl+1);
Position(1, 1) = 246.3; Position(2, 1) = 30.24;

% Mide el tiempo corrido
for x = 1:Anzahl
% valor aleatorio obtenido de [0, 2pi] para el angulo
```



```
ZufallWinkel = 2*pi*rand(1);
% paso aleatorio de longitud de [0, weite]
ZufallWeite = Weite*rand(1);
Position(1, x+1) = round(Position(1,
x)+ZufallWeite*cos(ZufallWinkel))+Driftx;
Position(2, x+1) = round(Position(2,
x)+ZufallWeite*sin(ZufallWinkel))+Drifty;
end;
%toc;
x = 1:Anzahl+1; y = 1:Anzahl+1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Plot de random walk
plot(Position(1,x), Position(2,y), 'k-');
hold off;
a=Position(1,x);
s=Position(2,y);
p2=zeros(1,Anzahl);
for i=1:Anzahl
    dm=sqrt(((a(1,i+1)-a(1,i)).^2)+ ((s(1,i+1)-s(1,i)).^2));
    p2(1,i)=dm;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Graficamos la densidad de potencia total.
figure(3);
plot(Position(1,x), Position(2,y), 'k-');
hold on
mesh(X,Y,S_total);
%axis([xmin xmax ymin ymax])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

fprintf('\nr\tTHETA\t') %Imprime el r y THETA
% for i=1:n2 %Para i desde 1 hasta n2
fprintf('S_d\t\t\t\t',i) %Imprime los rótulos de S de cada contribución
%end
    fprintf('S_total\n') %Imprime el rotulo Total
    for i=1:Anzahl %Para i desde 1 hasta n2
fprintf('%d\t%d\t',x(1,i),y(1,i)) %Imprime los valores de a(i) y b(i)
fprintf('\t%d',S(x(1,i),y(1,i),:)) %Imprime los valores de las N
contribuciones de i
fprintf('\t%d\n',S_total(x(1,i),y(1,i))) %Imprime la densidad total de i
    end

% Velocidad de una persona adulta de edad avanzada es de 0.92m/s
t=p2./0.92;
i=1:Anzahl;
c(i)=S_total(1,i);
E=(c(i)).*t;
T=sum(E);
p(1,j)=T;
S_total=[];
end

xlabel('X y Y: Coordenadas en el plano. Z: Potencia recibida')
```



## Anexo B. M-File para simular el efecto de MIMO en la capacidad de canal en LTE.

Fuente: extraído de [20].

```
clear all
close all
clc

nt_V = [1 2 2 3 4];
nr_V = [1 2 3 2 4];

N0 = 1e-4;
B = 1;
Iteration = 1e4; %
SNR_V_db = [0:5:30];
SNR_V = 10.^(SNR_V_db/10);

color = ['b'; 'r'; 'g'; 'k'; 'c'];
notation = ['-o'; '->'; '<-'; '-^'; '-s'];

for(k = 1 : 5)
    nt = nt_V(k);
    nr = nr_V(k);
    for(i = 1 : length(SNR_V))
        Pt = 0.007075;
        for(j = 1 : Iteration)
            H = random('rayleigh',1,nr,nt);% Matriz de Rayleigh
            [S V D] = svd(H);
            landas(:,j) = diag(V);
            [Capacity(i,j) PowerAllo] =
WaterFilling_alg(Pt,landas(:,j),B,N0);
        end
    end
    f1 = figure(1);
    hold on
    plot(SNR_V_db,mean(Capacity'),notation(k,:), 'color',color(k,:))

    f2 = figure(2);
    hold on
    [y,x] = hist(reshape(landas,[1,min(nt,nr)*Iteration]),100);
    plot(x,y/Iteration, 'color',color(k,:));
    clear landas
end

f1 = figure(1)
legend_str = [];
for( i = 1 : length(nt_V))
    legend_str =[ legend_str ;...
        {'nt = ',num2str(nt_V(i)),', ', nr = ',num2str(nr_V(i))}];
end
legend(legend_str)
grid on
set(f1, 'color',[1 1 1])
xlabel('SINR en dB')
ylabel('Capacidad bits/s/Hz')
```

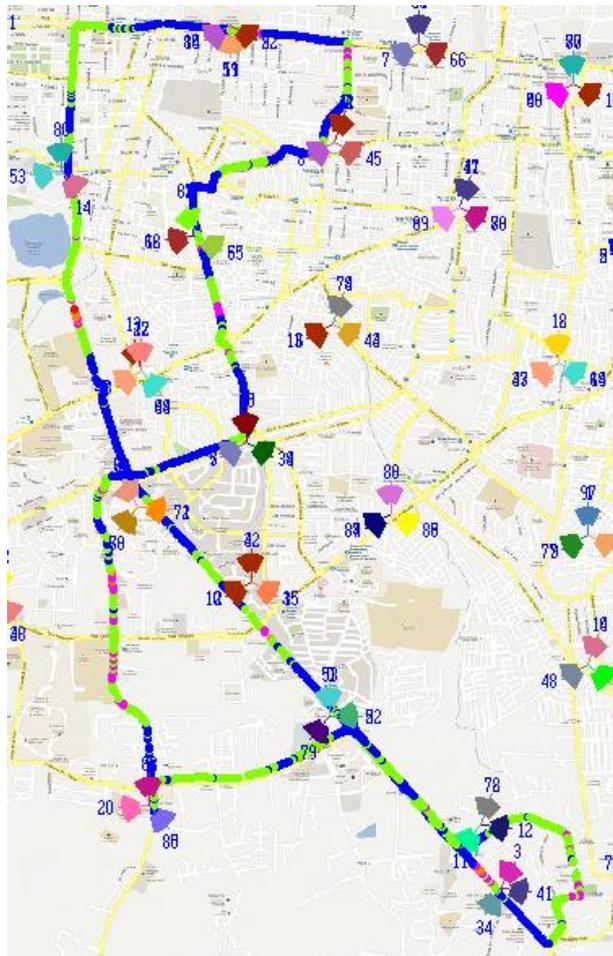


**Anexo C. Gráficas de los resultados del Drive Test con Yota mostrando los niveles de:**

**1. Relative Signal Strength Indicator.**

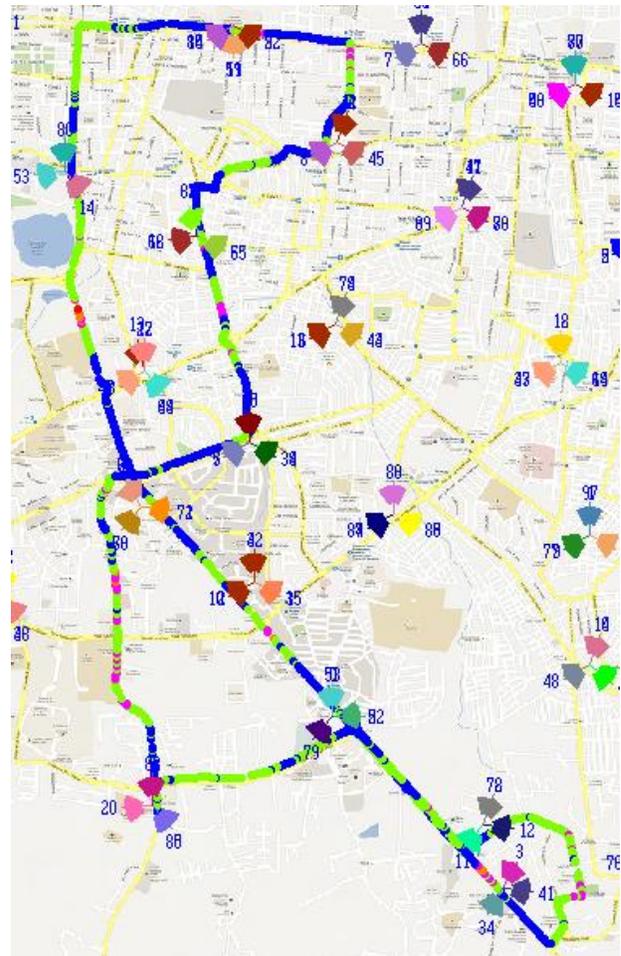
*Drive Test 1A. Fecha: 05-04-2013.*

*Drive Test 1B. Fecha: 15-04-2013.*



Beceem CPE Power Info RSSI All Data [dBm] Port 1

- -60 <= x < 0 ( 53.80%, 1800 )
- -75 <= x < -60 ( 40.71%, 1362 )
- -83 <= x < -75 ( 4.84%, 162 )
- -92 <= x < -83 ( 0.63%, 21 )
- -120 <= x < -92 ( 0.03%, 1 )

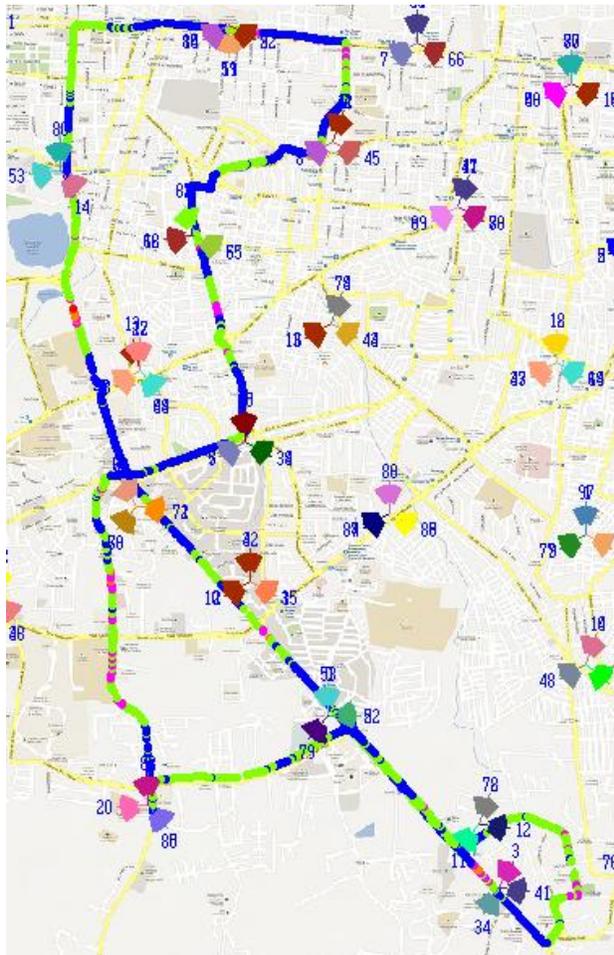


Beceem CPE Power Info RSSI All Data [dBm] Port 1

- -60 <= x < 0 ( 53.80%, 1800 )
- -75 <= x < -60 ( 40.71%, 1362 )
- -83 <= x < -75 ( 4.84%, 162 )
- -92 <= x < -83 ( 0.63%, 21 )
- -120 <= x < -92 ( 0.03%, 1 )



*Drive Test 1C. Fecha 22-04-2013*



Beceem CPE Power Info RSSI All Data [dBm] Port 1

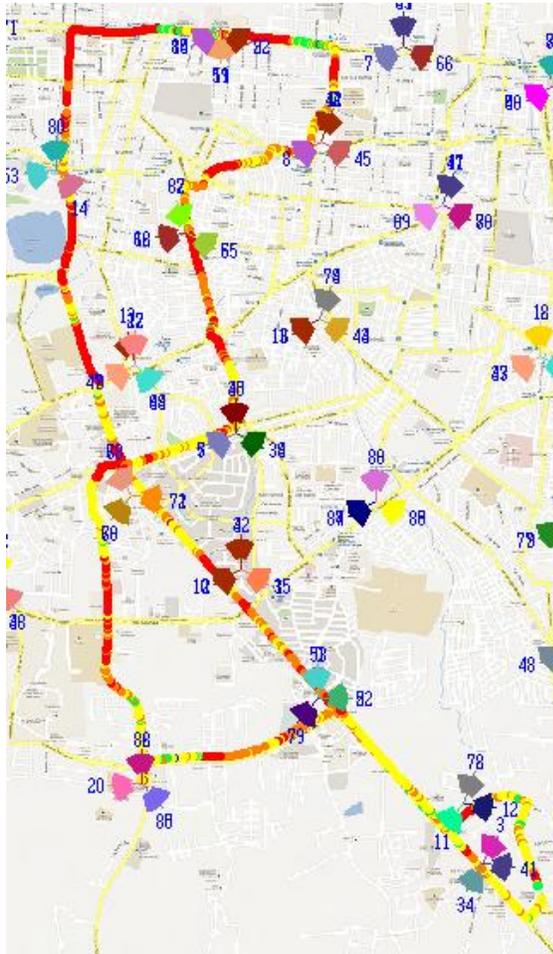
- -60 <= x < 0 (53.80%, 1800)
- -75 <= x < -60 (40.71%, 1362)
- -83 <= x < -75 (4.84%, 162)
- -92 <= x < -83 (0.63%, 21)
- -120 <= x < -92 (0.03%, 1)



## 2. Download Throughput.

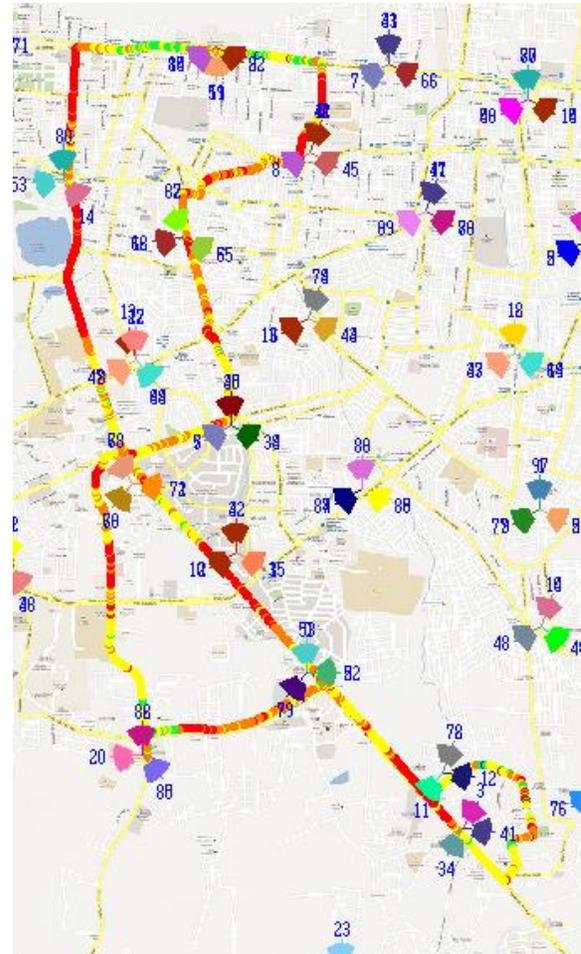
Drive Test 2A. Fecha: 05-04-2013.

Drive Test 2B. Fecha: 15-04-2013.



Beceem CPE Throughput Info Downlink DL Rate All Data [Kbps] Port 1

- 6144  $\leq x$  (0.05%, 2)
- 4096  $\leq x < 6144$  (5.19%, 189)
- 2048  $\leq x < 4096$  (49.49%, 1803)
- 1024  $\leq x < 2048$  (23.74%, 865)
- 0  $\leq x < 1024$  (21.52%, 784)

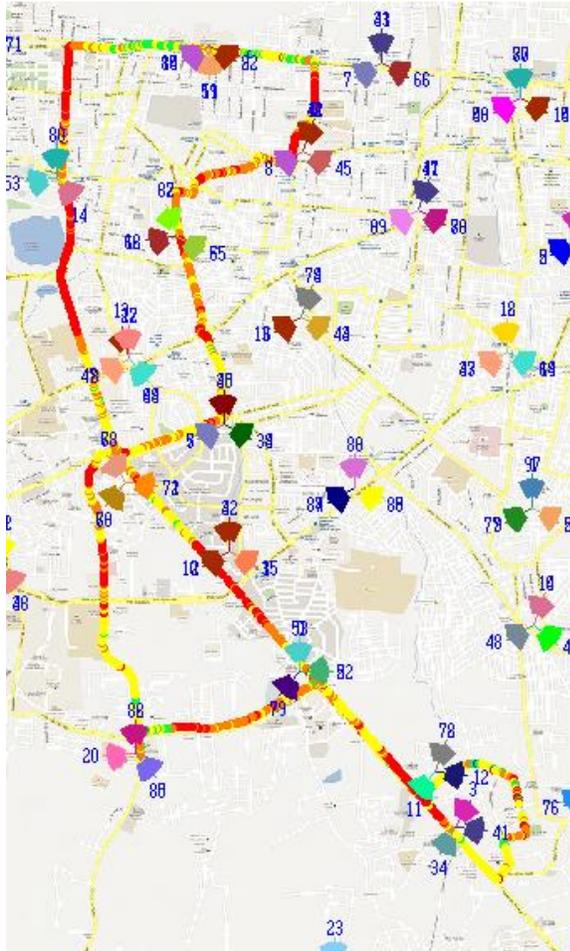


Beceem CPE Throughput Info Downlink DL Rate All Data [Kbps] Port 1

- 6144  $\leq x$  (0.10%, 3)
- 4096  $\leq x < 6144$  (3.72%, 117)
- 2048  $\leq x < 4096$  (43.55%, 1371)
- 1024  $\leq x < 2048$  (28.46%, 896)
- 0  $\leq x < 1024$  (24.17%, 761)



*Drive Test 2C. Fecha: 22-04-2013*



Beceem CPE Throughput Into Downlink DL Rate All Data [Kbps] Port 1

- 6144  $\leq x$  (0.10%, 3)
- 4096  $\leq x < 6144$  (3.72%, 117)
- 2048  $\leq x < 4096$  (43.55%, 1371)
- 1024  $\leq x < 2048$  (28.46%, 896)
- 0  $\leq x < 1024$  (24.17%, 761)



Anexo D. Acuerdo Administrativo 007-2005 de Telcor para la parte alta y baja de la banda de 700 MHz. Fuente: extraído de [21].

1. Tabla del Plan de Frecuencias de la Parte Baja de la Banda de 700 MHz.



Bloque	Frecuencias (MHz)	Ancho de Banda	Pares
A	698-704, 728-734	12 MHz	2 x 6 MHz
B	704-710, 734-740	12 MHz	2 x 6 MHz
C	710-716, 740-746	12 MHz	2 x 6 MHz
D	716-722	6 MHz	impar
E	722-728	6 MHz	impar





2. Tabla del Plan de Frecuencias de la Parte Alta de la Banda de 700 MHz.



1.2 TABLA DEL PLAN DE FRECUENCIAS DE LA PARTE ALTA DE LA BANDA DE 700 MHz

60	61	62	RESERVA (Seguridad Pública)	63	64	65	66	67	68	69
A	B	C		A	B	C		RESERVA (Seguridad Pública)		

Bloque	Frecuencias (MHz)	Ancho de Banda	Pares
A	746-752, 776-782	12 MHz	2 x 6 MHz
B	752-758, 782-788	12 MHz	2 x 6 MHz
C	758-764, 788-794	12 MHz	2 x 6 MHz
RESERVA	764-770, 794-800	12 MHz	2 x 6 MHz
RESERVA	770-776, 800-806	12 MHz	2 x 6 MHz

El presente acuerdo administrativo entrará en vigencia a partir de la fecha de su firma por el Director General de TELCOR, sin perjuicio de su posterior publicación en la Gaceta, Diario Oficial.

Dado en la ciudad de Managua, a los diez días del mes de Enero del año dos mil cinco.

  
**LIC. JOEL GUTIERREZ GONZALEZ**  
 Director General



