



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN

Trabajo Monográfico para optar al título de Ingeniero en Telecomunicaciones.

Tema

Implementación de estrategia de mitigación de interferencia Inter-Celda en un despliegue de red LTE en la zona urbana del municipio de Managua.

Autor

Br. Winston Enmanuel Alegría Delgado.

Tutor

Msc. Cedrick Dalla Torre Parrales.

Diciembre del 2023

Managua, Nicaragua.

Dedicatoria

El presente trabajo monográfico lo dedico a Dios, ya que me ha bendecido en gran manera fortaleciéndome en cada paso que me ha llevado a la culminación de este trabajo. A mis padres y hermanos, por brindarme su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y por inspirarme en la consistencia y disciplina para lograr esta meta.

Agradecimientos

Agradezco en gran manera la instrucción del mi tutor Msc. Cedrick Dalla Torre, por su apoyo en la culminación de este trabajo monográfico y por compartirme sus conocimientos en el proceso que tomó este trabajo. De la misma manera agradezco al Ingeniero, TeKnL. Norman Vargas Chevez por cada observación que me encaminó en la investigación documental apropiada y todas sus recomendaciones. Expreso mi agradecimiento al Ingeniero José María Gómez Rojas por la experiencia compartida en redes móviles, sus recomendaciones y por su disponibilidad apoyando a la culminación de este trabajo.

Índice de abreviaciones

LTE	Long Term Evolution
3GPP	3rd Generation Partnership Project
PRB	Physical Resource Block
SNR	Signal to Noise Ratio
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
SU-MIMO	Single-User Multiple-Input Multiple-Output
UE	User Equipment
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
SC-OFDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak to Average Power Ratio
RAN	Radio Access Network
CN	Core Network
EPC	Evolve Packet Core
EPS	Evolve Packet System
MME	Mobility Management Entity
S-GW	Serving Gateway
P-GW	Packet Data Network
HSS	Home Subscriber Service
E-UTRAN	Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
CQI	Channel Quality Indicator
QoS	Quality of Service
RSSI	Received Signal Strength Indicator

RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
SINR	Signal to Interference & Noise Ratio
PCI	Physical Cell Id
TAC	Tracking Area Code
CoMP	Coordinated Multi-Point transmission/reception
eICIC	Enhanced Inter-Cell Interference Coordination
FFR	Fractional Frequency Reuse
C/(i+N)	Carrier Interference plus Noise Ratio
EARFCN	E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number
UE	User Equipment
UICC	Universal Integrated Circuit Card
dB	Decibel
dBm	Decibel Milliwatts
DL	Downlink
UL	Uplink
FDD	Frequency-Division Duplexing
SPM	Standard Propagation Model

Resumen

La tecnología de LTE cuenta con un reuso universal de frecuencia de tal manera que todos los recursos de radio están disponibles en cada celda. Ya que la tecnología LTE utiliza el reuso universal de frecuencia, se ha encontrado afectaciones para usuarios ubicados de zonas de overlapping, donde dos o más celdas comparten cobertura. Los usuarios en zonas de overlapping pueden verse afectados por la interferencia inter-celda al recibir el mismo bloque de recurso en frecuencia de parte de celdas adyacentes. Por lo último mencionado se han desarrollado estrategias para mejorar los niveles de interferencia y mejorar la velocidad de datos para usuarios ubicados en centro de celdas y sobre todo ubicados en bordes de celda o zonas de overlapping. Este trabajo monográfico se enfoca en implementar estrategias de mitigación de interferencia como ICIC, SU-MIMO y tilt eléctrico y mecánico para escenarios de red dados, de tal manera que se evalúe la eficiencia de throughput y niveles de interferencia por cada estrategia. Para hacer esto posible primeramente se realizó un site survey obteniendo información de sitios existentes en la capital Managua en una zona de alto tráfico de usuarios. Se realizó un drive test en una ruta establecida y se evaluó el resultado obtenido para el drive test en modo idle y modo activo. Con el drive test modo activo se identificaron zonas afectadas por interferencia y su comparación con los niveles de throughput obtenidos. Se utilizó la herramienta de Atoll para crear la red LTE donde se importó el cell file con la información correspondiente a los sitios actuales de la red incluyendo potencia de transmisión, tilt eléctrico/mecánico, azimut, altura de transmisor, entre otros. Se realizó la calibración del modelo SPM importando el drive test al módulo de CW Measurement en Atoll. Se crearon dos escenarios de red, el primer escenario con 700 usuarios por km^2 representando el 100% y un segundo escenario de 490 usuarios por km^2 representando el 70%. Se aplicaron las estrategias de mitigación de interferencia para cada escenario y como resultado se obtuvo que para el primer escenario la mejor estrategia es ICIC Time-switched entregando los mejores niveles de throughput para DL y los mejores niveles de $C/(i+N)$. Por último, para el segundo escenario se obtuvo que la mejor estrategia es la ICIC-Soft para el throughput alcanzado.

ABSTRACT

LTE technology relies on universal frequency reuse so that all radio resources are available in each cell. Since LTE technology uses universal frequency reuse, it has been found to affect users located in overlapping zones where two or more cells share coverage. Users in overlapping zones may be affected by inter-cell interference when receiving the same frequency resource block from adjacent cells. For the last mentioned, strategies have been developed to improve interference levels and improve data rate for users located in the center of cells and especially located in cell edges or overlapping zones. This monographic work focuses on implementing interference mitigation strategies such as ICIC, SU-MIMO and electrical and mechanical tilt for given network scenarios in order to evaluate the throughput efficiency and interference levels for each strategy. To make this possible, first a site survey was conducted obtaining information from existing sites in the capital city of Managua in an area with high user traffic. A drive test was performed on an established route and the results obtained for the drive test in Idle mode and active mode were evaluated. With the active mode drive test, areas affected by interference were identified and compared with the throughput levels obtained. The Atoll tool was used to create the LTE network where the cell file was imported with the information corresponding to the current network sites including transmission power, electrical/mechanical tilt, azimuth, transmitter height, and others. The SPM model calibration was performed by importing the drive test to the CW Measurement module in Atoll. Two network scenarios were created, the first scenario with 700 users per km² representing 100% and a second scenario of 490 users per km² representing 70%. Interference mitigation strategies were applied for each scenario and the result was that for the first scenario the best strategy is ICIC Time-switched providing the best throughput levels for DL and the best C/(i+N) levels. Finally, for the second scenario it was obtained that the best strategy is ICIC-Soft for the achieved throughput.

Índice de contenido

Capítulo I. Introducción	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Justificación.....	4
Capítulo II. Marco Teórico	5
2.1 Tecnología móvil	5
2.2 4G LTE.....	5
2.2.1 Arquitectura	6
2.2.2 Red núcleo o Evolved Packet Core (EPC)	7
2.2.3 Radio-Access Network	8
2.2.4 Bloques de recursos físicos o PRB.....	8
2.2.5 Gestor de recursos de radio o Scheduling.....	10
2.2.6 OFDMA.....	11
2.2.7 SC-FDMA	11
2.2.8 Azimut o dirección	11
2.3 Parámetros de Medición en LTE	12
2.4 Interferencia en sistemas LTE.....	13
2.4.1 Estrategias de mitigación de interferencia	13
2.4.2 Coordinador de interferencia inter-celda ICIC	13
2.4.3 Gestión estática ICIC.....	14
2.4.4 Ángulo de inclinación de antenas por tilt eléctrico y mecánico	16
2.4.5 Diversidad de antenas	17
2.4.6 MIMO	18
2.4.7 SU-MIMO.....	18
2.5 Medición y Tipos de Mediciones	18

2.5.1	Medición Pasiva.....	18
2.5.2	Medición Activa.....	19
2.5.3	Drive Test.	19
2.6	Herramienta para diseño de la red de tecnología Inalámbrica	19
2.6.1	Atoll.....	19
2.6.2	Formula de Standard Propagation Model SPM	20
2.6.3	Google Earth.....	21
Capítulo III. Diseño Metodológico.....		22
3.1	Diagrama de elaboración de diseño metodológico.	23
3.2	Elaboración de drive test.....	24
3.3	Site survey	25
3.4	Ruta de drive test	28
3.5	Drive test	29
3.6	Equipo de recepción UE.....	29
3.7	Aplicación Tems Pocket.....	30
3.8	Descripción del drive test	31
3.9	Post-Procesamiento	33
3.9.1	Resultado de Post-Procesamiento	33
3.10	Análisis de resultados con Tems Discovery.....	34
3.11	Representación de SINR para drive test modo activo con TEMS Discovery	38
3.12	Representación de Throughput con TEMS Discovery	39
3.13	Identificación de zonas con niveles de interferencia	40
Capítulo IV. Creación de escenarios de red y aplicación de estrategias.....		42
4.1	Introducción.....	42

4.2	Creación de un proyecto de red LTE.....	42
4.3	Configuración de red LTE	43
4.4	Elección de banda de frecuencia	46
4.5	Calibración del modelo de estimación de pérdidas SPM	46
4.5.1	Descripción de la calibración para el modelo SPM.....	46
4.6	Estudios realizados en Atoll	49
4.7	Creación de escenarios de red LTE	55
4.7.1	Mapa de tráfico	55
4.7.2	Configuración de servicios.....	56
4.7.3	Configuración de Radio Bearer	57
4.7.4	Configuración de movilidad de usuarios	57
4.7.5	Configuración de terminal	58
4.7.6	Configuración de perfiles de usuario	58
4.7.7	Configuración de tipo de entorno.....	59
4.8	Packet Scheduling.....	61
4.9	Resultados de simulación Monte Carlo primer escenario	61
4.9.1	Resultados de simulación por servicio y sitio	65
4.9.2	Predicción de Throughput.....	66
4.9.3	Predicción de $C/(i+N)$	67
4.10	Resultados de simulación Monte Carlo segundo escenario.....	68
4.10.1	Resultados de simulación por servicio y sitio	69
4.10.2	Predicción de Throughput	70
4.10.3	Predicción de $C/(i+N)$	71
4.11	Implementación de estrategias de mitigación de interferencia.....	72
4.11.1	Estrategia de Coordinación de Interferencia Inter Celda ICIC	72

4.11.2	Predicción Delta Path Loss	73
4.11.3	Configuración de ICIC Delta Path Loss Threshold	74
4.11.4	Configuración de Frames en Atoll	74
4.12	Resultados de las estrategias ICIC	77
4.12.1	Resultados de la estrategia ICIC primer escenario	77
4.12.2	Resultados de la estrategia ICIC segundo escenario.....	78
4.13	Estrategia Single User Multiple Input Multiple Output SU-MIMO	79
4.13.1	Resultados de la estrategia SU-MIMO primer escenario.....	80
4.13.2	Resultados de la estrategia SU-MIMO segundo escenario	81
4.14	Estrategia de variación de Tilt Eléctrico/Mecánico	82
4.14.1	Resultados de la estrategia Tilt primer escenario.....	83
4.14.2	Resultados de la estrategia Tilt segundo escenario	84
Capítulo V. Análisis de resultados por escenario		85
5.1	Análisis de throughput primer escenario de red	85
5.2	Análisis de Bearer (DL)	87
5.3	Análisis de $C/(i+N)$ (DL)	89
5.4	Análisis de usuario en zona de overlapping	90
5.5	Análisis de throughput segundo escenario.....	91
5.6	Análisis de Bearer (DL)	93
5.7	Análisis de $C/(i+N)$ (DL)	94
5.8	Análisis de usuario en zona de overlapping	95
Conclusiones.....		97
Recomendaciones.....		99
Bibliografía		100
Anexo		104

Anexo 1: Manual para el software de simulación Atoll.....	104
---	-----

Índice de Figuras

Figura 1. Arquitectura de Red Núcleo de LTE [9].....	7
Figura 2. Interfaces de Radio-Access Network [9].	8
Figura 3. Azimut o dirección de antena sectorial. [12].....	12
Figura 4. Posible reuso de frecuencia implementado en ICIC LTE [4].	16
Figura 5. Esquema de inclinación de antena [15].....	17
Figura 6. Ruta de Drive. Elaboración propia.....	28
Figura 7. Categorías de equipos de usuario [24].....	29
Figura 8. Interfaz gráfica de la aplicación Tems Pocket [25].	30
Figura 9. Drive Test Nivel de intensidad de señal o RSRP herramienta Tems Discovery. Elaboración propia.....	32
Figura 10. Niveles SINR drive test modo activo. Elaboración propia.	38
Figura 11. Niveles Throughput drive test modo activo. Elaboración propia.....	39
Figura 12. Velocidad pico y velocidad bruta según el canal utilizado [23].	40
Figura 13. Relación de SINR y Throughput. Elaboración propia.	41
Figura 14. Relación de SINR y Throughput. Elaboración propia.	41
Figura 15. Mapas importados en Atoll. Elaboración propia.	43
Figura 16. Importación de mediciones de Drive test. Elaboración propia.....	47
Figura 17. Importación de Drive Test en el módulo CW. Elaboración propia.	48
Figura 18. (a) Niveles RSRP sitio MN01 sin calibrar (b) Niveles RSRP sitio MN01 calibrado.....	50
Figura 19. Predicción de nivel de señal sitio MN03 con Drive test. Elaboración propia.	51
Figura 20. (a) Niveles RSRP de toda la red con SPM default. (b) Niveles RSRP de toda la red con SPM calibrado.	52
Figura 21. Cobertura por transmisores. Elaboración propia.	53
Figura 22. Estudio por Overlapping zones. Elaboración propia.....	54
Figura 23. Configuración de técnicas de modulación empleadas en Atoll. Elaboración propia.	57
Figura 24. Configuración de movilidad de usuarios. Elaboración propia.	57
Figura 25. Configuración de perfil de usuario. Elaboración propia.	58

Figura 26. Configuración de entorno densamente urbano primer escenario. Elaboración propia.	59
Figura 27. Configuración de entorno densamente urbano segundo escenario. Elaboración propia.	60
Figura 28. Resultado de simulación Monte Carlo. Elaboración propia.	61
Figura 29. Ventana de estadísticas de simulación Monte Carlo. Elaboración propia	63
Figura 30. Resultado de simulación para un usuario en la red. Elaboración propia.	63
Figura 31. Predicción throughput para toda la red. Elaboración propia.....	66
Figura 32. Predicción $C/(i+N)$ para toda la red. Elaboración propia.	67
Figura 33. Ventana de estadísticas de simulación Monte Carlo. Elaboración propia.	68
Figura 34. Predicción de throughput para toda la red. Elaboración propia.....	70
Figura 35. Predicción $C/(i+N)$ para toda la red. Elaboración propia.	71
Figura 36. Predicción Delta Path Loss. Elaboración propia.	73
Figura 37. Estrategias ICIC en Atoll [32].	74
Figura 38. Configuración de Frames en Atoll. Elaboración propia.	75
Figura 39. Plantilla LTE. Elaboración propia.	104
Figura 40. Configuración de coordenadas. Elaboración propia.....	105
Figura 41. Importación de Heights. Elaboración propia.....	105
Figura 42. Importación de clutter. Elaboración propia.	106
Figura 43. Colores de clutter. Elaboración propia.	106
Figura 44. Uso de Filter Assistant. Elaboración propia.....	109
Figura 45. Creación de mapa de tráfico. Elaboración propia.	112

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de LTE [8]	5
Tabla 2. Número de PRBs por canalización en LTE [10].	8
Tabla 3. Velocidad pico bruta por usuario	9
Tabla 4. Site survey. Elaboración propia.	26
Tabla 5. Comparación entre los niveles SINR entre Drive test modo activo y modo Idle. Elaboración propia.	37
Tabla 6. Sitios importados en Atoll. Elaboración propia.	44
Tabla 7. Parámetros de Transmitters en Atoll. Elaboración propia.	45
Tabla 8. Elección de frecuencia de operación. Elaboración propia.	46
Tabla 9. Estudios independientes de la carga de tráfico. Elaboración propia.	49
Tabla 10. Estudios dependientes de la carga de tráfico. Elaboración propia.	49
Tabla 11. Configuración de servicios. Elaboración propia.	56
Tabla 12. Descripción de escenarios de red. Elaboración propia.	60
Tabla 13. Primer escenario de red. Resultado de simulación general y por servicio. Elaboración propia.	65
Tabla 14. Primer escenario de red. Resultado de simulación por sitio. Elaboración propia.	65
Tabla 15. Segundo escenario de red. Resultado de simulación general y por servicio. Elaboración propia.	69
Tabla 16. Segundo escenario de red. Resultado de simulación por sitio. Elaboración propia.	69
Tabla 17. Resultados de estrategia ICIC primer escenario. Elaboración propia. ..	77
Tabla 18. Resultados de estrategia ICIC segundo escenario. Elaboración propia.	78
Tabla 19. Resultados de la estrategia SU-MIMO primer escenario. Elaboración propia.	80
Tabla 20. Resultados de estrategia SU-MIMO segundo escenario. Elaboración propia.	81
Tabla 21. Variaciones de tilt eléctrico y mecánico. Elaboración propia.	82
Tabla 22. Resultados con estrategia de variaciones de inclinación de antena primer escenario. Elaboración propia.	83

Tabla 23. Resultados con estrategia de variaciones de inclinación de antena segundo escenario. Elaboración propia.	84
Tabla 24. Resultados de simulación Monte Carlo para todas las estrategias de mitigación. Elaboración propia.	86
Tabla 25. Modulaci3n por Km ² . Elaboraci3n propia.	88
Tabla 26. Resultados de C/(i+N) para DL. Elaboraci3n propia.....	89
Tabla 27. Análisis de usuario ubicado en zona de overlapping primer escenario. Elaboraci3n propia.	90
Tabla 28. Resultados de simulaci3n Monte Carlo para todas las estrategias de mitigaci3n. Elaboraci3n propia.	92
Tabla 29. Modulaci3n por Km ² . Elaboraci3n propia.	94
Tabla 30. Resultados de C/(i+N) para DL. Elaboraci3n propia.....	94
Tabla 31. Análisis de usuario ubicado en zona de overlapping segundo escenario. Elaboraci3n propia.	96

Capítulo I. Introducción

1.1 Introducción

El sistema de cuarta generación o LTE (Long Term Evolution) es una tecnología especificada por el 3GPP release 8, que se desarrolló para disminuir la congestión de tráfico de datos que los operadores móviles experimentaban en la red, permitiendo avances significativos en las transmisiones de servicios de datos consiguiendo velocidades pico de hasta 100 Mbps en enlace downlink y hasta 50 Mbps en enlace Uplink [1].

En Nicaragua el despliegue de LTE dio inicio en el año 2015 con el Release 8, teniendo un 65% de cobertura en el territorio nacional y más de 400,000 conexiones de usuarios según el porcentaje de crecimiento informado por la Cámara Nicaragüense de Internet y Telecomunicaciones (CANITEL) en el año 2018 [2]. Este crecimiento está vinculado a la generación de nuevas tecnologías de acceso para dar soporte a un mayor tráfico en la red y satisfacer los requerimientos de usuario.

Para satisfacer la demanda de los usuarios, los operadores de tecnología móvil en el municipio de Managua realizan nuevos despliegues de red LTE en zonas con tecnología ya existente, para atender a una creciente cantidad de usuarios o mejorar los servicios de red. Esto se resume en una mayor cantidad de eNodeBs, donde la cobertura de sus sectores puede sobreponerse a la cobertura de celdas vecinas, provocando así problemas en la asignación de recursos físicos, mayormente en las zonas de solapamiento entre celdas.

Los problemas de asignación de recursos físicos se dan cuando equipos de usuarios se encuentran en zonas donde la cobertura de dos o más celdas vecinas converge, pudiendo recibir el mismo Bloque de Recurso Físico (PRB) de un usuario de celda vecina en la misma subtrama. Este fenómeno se define como interferencia inter-celda. Los efectos de este tipo de interferencia conllevan a un deterioro en el servicio de la red impidiendo alcanzar altas velocidades de throughput en enlace descendente; disminución de Relación Señal a Ruido (SNR) por PRB, aumento de potencia de consumo en el terminal y aumento en la carga de señalización debido

a que son necesarias más retransmisiones híbridas (HARQ) para la entrega favorable de paquetes.

En el presente trabajo se aborda la problemática de interferencia inter-celda la cual afecta severamente la calidad de servicio como se mencionó anteriormente. Se responde a esta problemática mediante la implementación de estrategias de mitigación de interferencia como: la técnica de **coordinación de interferencia inter-celda ICIC** el cual hace uso de reuso de frecuencia fraccional y de la potencia de transmisión de los PRBs en bordes y centros de celda; **diversidad de transmisión MIMO**, mediante la técnica SU-MIMO enfocada en el mejoramiento de cobertura, reducción de interferencia y desvanecimiento de canal [1] y **configuraciones de tilt eléctrico y mecánico en las antenas por sitio**, con la que puede ser posible la reducción de interferencia inter-celda [3]. Estas estrategias se llevarán a cabo a través del simulador de red Atoll que a su vez permite la calibración de un modelo de estimación de pérdida importando información de drive test, lo cual arrojará una predicción más cercana a los niveles de señal de una red existente, creando también escenarios de red en una ruta establecida en la zona urbana del municipio de Managua. Como conclusión, se evaluarán los resultados por cada estrategia de mitigación y así se determinará la mejor estrategia para el escenario donde se vean mayores niveles de interferencia respecto al parámetro SNR, como también afectaciones de throughput.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Implementar estrategias de mitigación para reducir el nivel de interferencia inter-celda en un despliegue de red LTE en la zona Urbana del Municipio de Managua para mejorar la calidad de servicio.

Objetivos específicos

1. Realizar mediciones de campo en modo Idle y modo activo en una zona de alto tráfico para recolectar datos de parámetros de red como RSRP, RSRQ, CQI, SNR y throughput para identificar escenarios donde se encuentre interferencia inter-celda.
2. Configurar una red LTE en una zona de alto tráfico mediante el software de simulación Atoll con el fin de una posterior creación de escenarios donde se implementen estrategias de mitigación de interferencia.
3. Realizar simulaciones de escenarios de red donde se implementen estrategias de mitigación de interferencia como diversidad de transmisión SU-MIMO, coordinador de interferencia inter-celda ICIC, y ajustes físicos de antena.
4. Evaluar la eficiencia de las estrategias de mitigación de interferencia en enlace descendente respecto a valores de SNR y throughput, determinando así la estrategia más apropiada según el escenario de red.

1.3 Justificación

Nicaragua se ha visto influenciada positivamente por el desarrollo tecnológico, en especial la capital Managua, con la necesidad de contar con la red más rápida posible y con la menor latencia. Debido a esto, grandes despliegues de red de parte de los dos operadores principales del país han sido implementados. Sin embargo, los sistemas LTE presentan Interferencia Inter-Celda provocado principalmente por compartir los recursos asignados a cada usuario, especialmente cuando se mueven entre celdas. La interferencia inter-celda provoca grandes variaciones en la Relación Señal a Ruido (SNR) y baja velocidad de throughput, principalmente a los Equipos de Usuarios (UE) ubicados en zonas borde de la celda de cobertura, limitando el desempeño del sistema.

Si se aplica una estrategia de mitigación de interferencia, los niveles de y SNR presentes en las zonas de cobertura se verán mejorados, permitiendo una conexión sin deterioro considerable, es decir, las técnicas y estrategias de mitigación de interferencia inter-celda proporcionan una mejora en gran parte del territorio al que se da servicio, sobre todo en zonas bordes de cobertura en la que puede existir una alta densidad de usuarios. Además, puede incurrir en la mejora de velocidades de throughput en enlace descendente, especialmente para equipos de usuario que se encuentren en zonas de overlapping.

Teniendo en cuenta lo anterior, para este trabajo monográfico es de gran interés determinar la mejor estrategia de mitigación de interferencia que mejore la capacidad del sistema LTE, principalmente en la zona límite de celda. Esto se realizará a través de una serie de simulaciones con distintas estrategias de mitigación que apunten al aprovechamiento de los recursos de la red, y a su vez, que más usuarios puedan estar conectados y con el beneficio de una mejor calidad de conexión en la tecnología de cuarta generación.

Capítulo II. Marco Teórico

En el presente apartado se mencionan los temas más importantes para el desarrollo del presente trabajo desde la arquitectura de la red LTE como los tipos de interferencia en el sistema y los mecanismos de mitigación.

2.1 Tecnología móvil

Las redes de tecnologías móviles tienen como objetivo fundamental la disminución de la brecha digital de la población, permitiendo el desarrollo de actividades cotidianas y un mundo más conectado. Los sistemas de comunicaciones cuentan con tres elementos principales: El canal (medio físico por el cual una señal electromagnética es transmitida, viajando desde el transmisor al receptor), transmisor (encargado de que la información a transmitir se adapte al canal como a la capacidad de que el receptor pueda entender la señal) y el receptor (recibe la señal transmitida por el transmisor a través del canal de comunicación realizando un proceso inverso del realizado en el transmisor, para obtener la señal original).

2.2 4G LTE

LTE es una tecnología que integra características de GSM/GPRS y UMTS/HSPA. Su diseño es integrado en las recomendaciones y normas del 3GPP. La arquitectura de LTE es menos jerarquizada que 2G y 3G debido a que la gestión de radio es trasladada a los eNodeB, consiguiendo mayor rapidez en ejecución de los procedimientos y una latencia menor. En la siguiente tabla, se pueden encontrar algunas características de LTE:

Tabla 1. Características de LTE [8].

Parámetros	4G LTE
Máxima velocidad enlace de bajada (Mbps)	100Mbps
Máxima Velocidad enlace de subida (Mbps)	50Mbps
Latencia	10 ms
Año aproximado de lanzamiento	2010
Método de acceso	OFDMA/ SCFDMA

Entre los usos de 4G, la ejecución de aplicaciones de multimedia toma lugar ya que tenemos un mayor soporte gracias a la tecnología de rápida transmisión de datos, aún con usuarios en movimiento. LTE mejora la capacidad de conexiones inalámbricas entre dispositivos finales en los niveles de throughput. Algunas características de esta tecnología son [8]:

Características:

- Basado en conmutación de paquetes.
- Técnicas de acceso múltiple OFDMA para enlace descendente y SC-FDMA para enlace ascendente.
- Tiene un ancho de banda entre 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.
- Alcanza velocidades de 100 Mbps en movimiento y 1Gbps en reposo (teórico).
- Latencia reducida, con una mejor calidad de servicio.
- Mejor eficiencia espectral.
- Simplificación de estructuras de la red troncal.

2.2.1 Arquitectura

El sistema de arquitectura general de la red LTE propuesto por la 3GPP se compone por la Red Acceso de Radio o Radio Access Network (RAN) y la Red Núcleo o Core Network (CN). La red núcleo de LTE o Core Network es también conocida como Evolved Packet Core (EPC), responsable de funciones como autenticación y configuración de comunicación de un punto a otro. La Red de Acceso de Radio RAN, se encarga de la funcionalidad general de la red, como el manejo de los recursos de radio, protocolos de retransmisión, codificación, etc. De manera conjunta, Radio Access Network y Evolved Packet Core forman parte de una arquitectura de red plana, sin jerarquías, conocido como Evolved Packet System (EPS) [9].

2.2.2 Red núcleo o Evolved Packet Core (EPC)

Evolved Packet Core es una evolución de los sistemas de arquitectura presentes en GSM/GPRS y WCDMA/HSPA. Los componentes del esquema de la arquitectura de la Red Núcleo son:

- **Mobility Management Entity (MME):** Las funcionalidades de la entidad de administración de movilidad incluyen conexión y reconexión de radio bearers de un terminal, los cuales permiten la conexión del equipo de usuario y el Packet Data Network Gateway.
- **Serving Gateway (SGW):** Es el nodo que conecta Evolved Packet Core con la red de acceso RAN. El Serving Gateway actúa como ancla de movilidad cuando las terminales se mueven entre eNodeB.
- **Packet Data Network Gateway (PDN Gateway):** Conecta el EPC a internet. Se encarga de proporcionar direcciones IP a equipos de usuario, así como asegurar la calidad de servicio (QoS)

El EPC contiene también otro tipo de nodos tales como Función de Políticas y Reglas de Cargo (PCRF), responsable del manejo y cargo de la calidad de servicio QoS, y el nodo de Home Subscriber Service (HSS), base de datos que contiene información del subscriptor.

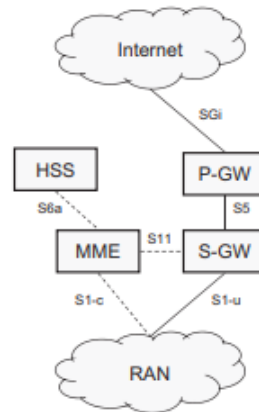


Figura 1. Arquitectura de Red Núcleo de LTE [9]

2.2.3 Radio-Access Network

La red de acceso LTE tiene una arquitectura plana con un solo tipo de nodo, eNodeB. El eNodeB es la estación base de RAN, donde se realizan acciones tales como: Gestión de recursos de radio, seguridad de la interfaz de radio y conectividad con la red troncal EPC. El eNodeB implementa las funciones de envío de datos y control de operatividad de la interfaz RAN o E-UTRAN [9].

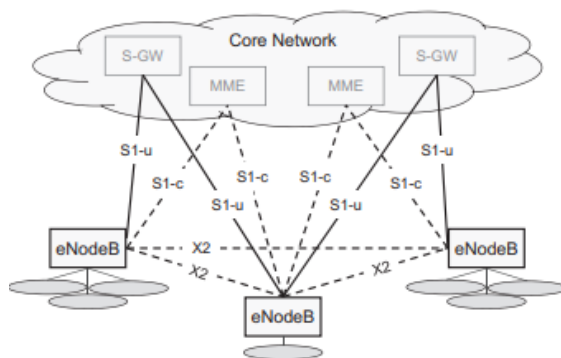


Figura 2. Interfaces de Radio-Access Network [9].

2.2.4 Bloques de recursos físicos o PRB

Se denomina PRB (*Physical Resource Block*) al mínimo de información que asigna un eNodeB a un equipo de usuario. Un PRB ocupa 180 kHz de banda equivalente a doce sub-portadoras equi-espaciadas 15 kHz entre ellas, y en él se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud de prefijo cíclico utilizada. La duración de un PRB es igual a 0,5 ms, es decir la duración de un slot o ranura temporal [10]. Según sea la canalización o ancho de banda en LTE se tendrá un número máximo de PRBs que podrán ser asignados a los usuarios por el Scheduler.

Tabla 2. Número de PRBs por canalización en LTE [10].

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10MHz	15 MHz	20 MHz
Número de PRB	6	15	25	50	75	100

La tabla describe el número máximo de PRBs que pueden ser asignados según el ancho de banda. Las velocidades que alcanza un usuario tienen relación con el número de PRBs, es decir, 1 PRB (180KHz) tiene 12 sub-portadoras asociadas a 7 símbolos OFDMA, por lo tanto, se consigue un total de 84 recursos. Los recursos pueden ser transmitidos con modulación QAM, 16 QAM y 64 QAM. Considerando una modulación 64-QAM (6 bits/símbolo) puede ser determinada la velocidad pico con la siguiente ecuación:

$$Velocidad Mbps = (84 recursos de radio) \times (6 bits de 64QAM) = 504 \frac{bits}{0.5s} \approx 1Mbps$$

Ecuación 1. Velocidad pico de usuario en relación al PRB con modulación de 64QAM

Tabla 3. Velocidad pico bruta por usuario

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10MHz	15 MHz	20 MHz
Velocidades pico (Mb/s)	≅6	≅15	≅25	≅50	≅75	≅100
Velocidad pico bruta por usuario (Mb/s)	≅5,1	≅12,8	≅21	≅42,5	≅63,7	≅85

La velocidad pico bruta por usuario es igual a la diferencia entre las velocidades pico y los bits ocupados para señalización y control entre el sistema, es decir, se resta un 15% de la velocidad pico utilizado para estos procesos. Sin embargo, estas velocidades de transmisión pueden mejorarse con la implementación de la técnica de diversidad de transmisión MIMO, llegando incluso a multiplicar su velocidad en arreglos 2X2 o 4X4. En caso de considerar una estructura MIMO 2x2 podemos estimar que las velocidades de pico serán el doble, es decir, se confirma que la interfaz aire del sistema LTE puede alcanzar los 150Mb/s en el enlace descendente si dispone de una canalización 20 MHz. Otra técnica utilizada es la de agregación de portadora, perteneciente al release 10 según el estándar 3GPP para LTE-Advanced.

2.2.5 Gestor de recursos de radio o Scheduling

El Scheduler es un gestor de recursos de radio que asigna de forma dinámica los recursos físicos (PRBs) del sistema LTE a los usuarios o UEs. La asignación de recursos se realiza a través de la interfaz de radio, conlleva varias subtarefas como decidir qué usuarios van a transmitir en canal PDSCH (en downlink), en qué recurso de interfaz de radio o formato de transporte. El Scheduler considera la calidad de canal asociado a un usuario. También podría asignar recursos a varios terminales en una misma subtrama, por ello, el scheduler necesita de la información del estado de los terminales mediante *Channel Status Reports*. La decisión de scheduling se envía a los UEs a través de PDCCH, donde se detalla para cada PRB la identidad del terminal y la información necesaria para decodificar el bloque de transporte. La entrega de recursos físicos puede realizarse en diferentes maneras que permite el Scheduler como se describe a continuación [10]:

- Round Robin: Asigna porciones iguales de datos durante el mismo tiempo a cada usuario. Este método no toma en consideración la calidad del canal del usuario, por lo tanto, no es adaptado a las necesidades de los usuarios.
- Proporcional Fair: Toma en cuenta las condiciones del canal de usuario. El bloque de recurso es asignado al usuario con alta prioridad. Asigna los recursos en vista a la calidad que experimenta dicho usuario actualmente cuando es mayor a la calidad media del mismo.
- Proporcional Demand: Asigna los recursos de forma proporcional a la demanda de throughput, es decir, los usuarios que soliciten niveles mayores de throughput obtendrán mayores niveles que aquellos que solicitan menores niveles de throughput máximo.
- Maximum C/I: El gestor asigna el mayor throughput a usuarios que han reportado el más alto CQI. Favorece ventaja a los usuarios cerca del eNodeB, los usuarios lejanos (donde se presentan interferencias y atenuaciones) son menos probables para ser seleccionado por el scheduler y se ven penalizados al punto de no poder cumplir con requerimientos QoS.

2.2.6 OFDMA

OFDMA es una técnica de acceso basada en OFDM que se utiliza en el DL de E-UTRAN. OFDMA está basada en la modulación multiportadora y en el acceso múltiple por división de frecuencia. OFDMA utiliza múltiples subportadoras ortogonales, cada una se modula de manera separada, y las distribuye a diferentes usuarios al mismo tiempo de tal manera que múltiples usuarios puedan ser programados para recibir los datos simultáneamente [11]. Con la asignación de más subportadoras se puede mejorar la calidad de servicio que un usuario tenga asignado, también se puede mejorar la velocidad de transmisión. Gracias a OFDMA es posible enviar varias transmisiones de datos simultáneas de diferentes usuarios en subportadoras diferentes, mejorando la eficiencia de la red [2].

2.2.7 SC-FDMA

En SC-FDMA se transmite un símbolo de determinado usuario en un conjunto de subportadoras simultáneamente. Todas las subportadoras en el uplink son moduladas con el mismo símbolo. Adoptar este esquema de modulación en el uplink es muy ventajoso para reducir el PAPR (Peak to Average Power Ratio), factor que mide la relación entre la potencia instantánea de la señal transmitida respecto de la potencia media y por lo tanto permite incrementar la eficiencia de los amplificadores de potencia [2].

2.2.8 Azimut o dirección

El azimut es el ángulo de orientación que tiene una antena desde su punto de ubicación hacia su objetivo de cobertura, se mide en grados y el punto de referencia que se toma para iniciar a medir es el norte. Las variaciones de azimut se realizan según estudios de cobertura de interés sobre una determinada zona donde se encuentra el eNodeB [12].

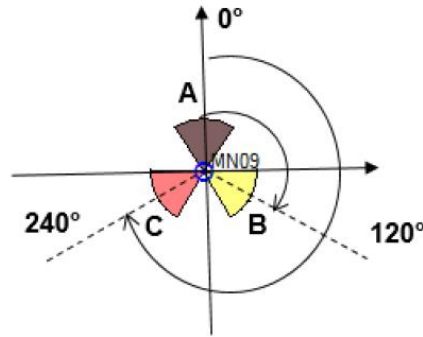


Figura 3. Azimut o dirección de antena sectorial. [12]

2.3 Parámetros de Medición en LTE

Para determinar el estado de la red a través de mediciones y monitoreo, se utilizan parámetros que determinan y establecen respuesta de los transmisores y receptores, relación señal a ruido, potencia de la señal y demás características de las estructuras de la red. Entre los parámetros más importantes se encuentran [13]:

- **RSSI Received Signal Strength Indicator:** Mide total de potencia recibida observada en símbolos OFDM en ancho de banda de medición sobre bloques de recursos
- **Reference Signal Received Power (RSRP):** Estimación de la señal recibida a nivel de celda de los elementos de recurso. Promedio lineal sobre potencia recibida en un ancho de banda específico
- **Reference Signal Received Quality (RSRQ):** Calidad de señal de referencia recibida, utilizada como complemento a la selección de la celda, además de RSRP
- **Signal to Interference & Noise Ratio (SINR):** Calidad de señal. Cuantifica las relaciones entre las condiciones de RF y el rendimiento, más específicamente, relación entre la potencia utilizable media y la interferencia media más el ruido de fondo presente en el receptor $S/I+N$.
- **SNR Signal to Noise Ratio:** Relación de potencia señal a ruido S/N .
- **PCI Physical Cell ID:** Es un código que identifica a la celda de forma única, y es reconocido por el terminal móvil para los procesos de “network attach” y “handover”.

- **CQI Channel Quality Indicator:** Es un indicador que lleva la información sobre qué tan buena o mala es la calidad del canal de comunicación.
- **TAC Tracking Area Code:** Un TAC es el código único que cada operador asigna a cada uno de sus Tracking Area. La red LTE debe tener información de ubicación actualizada acerca de los UE en estado de reposo para averiguar en qué Tracking Area un UE particular se encuentra.

2.4 Interferencia en sistemas LTE

En los sistemas de redes móviles pueden encontrarse dos tipos de interferencias, la intra-celda causada entre usuarios que se encuentran en una misma celda, e inter-celda causada por transmisiones de usuarios que se encuentran en celdas distintas. El sistema LTE está libre de interferencia intra-celda gracias a la función del gestor de recursos de radio Scheduling, garantizando la entrega de bloques de recursos (PRBs) a los usuarios. Sin embargo, LTE si cuenta con interferencia inter-celda, la cual ocurre cuando los mismos PRBs se asignan a usuarios en celdas vecinas en la misma subrama.

2.4.1 Estrategias de mitigación de interferencia

En sistemas LTE existen muchas técnicas que apuntan a la reducción de los niveles de interferencia inter-celda, que son aplicadas en zonas de overlapping y que normalmente existe una alta densidad de tráfico de usuarios. LTE cuenta con una estrategia que es propia en su sistema conocida como Coordinación de interferencia inter-celda (ICIC), en la que se realizan variaciones con el rehúso de frecuencia.

2.4.2 Coordinador de interferencia inter-celda ICIC

LTE define una función de gestión de recursos radio denominada *InterCell Interference Coordination* (ICIC) la cual tiene como objetivo establecer un conjunto de restricciones y preferencias sobre el uso y las potencias de transmisión por PRB para cada eNB. Existen dos formas de realizar la gestión [4]:

- **Coordinación dinámica:** ICIC logra reducir la interferencia permitiendo a las celdas individuales coordinar sus decisiones de scheduling con sus celdas vecinas. En la que es necesario que los eNBs interactúen entre sí,

intercambiando indicadores de interferencia a través de la interfaz X2, lo que sin embargo se traduciría en un incremento de los mensajes de señalización que cursan por la red. Esta coordinación puede realizarse de dos maneras, proactiva y reactiva. En el primer caso el eNodeB notifica con antelación a los eNodeB vecinos el uso que hará de los PRBs en frecuencia, es decir, la potencia que utilizará para sus transmisiones. Para el segundo caso se consideran medidas del pasado, así, si un eNodeB detecta interferencia elevada notifica a sus vecinas a fin de reducir la interferencia.

- Gestión estática: Cada eNB se le asigna durante la etapa de despliegue y planificación de la red las restricciones y preferencias de transmisión asociadas principalmente al establecimiento de factores de reúso de frecuencias, y que cuya implementación no implica ningún tipo de aumento de la carga de la red por señalización.
- Gestión de modelos centralizados: Orientado a redes heterogéneas de LTE-A release 10. Puede realizarse en la coordinación de CoMP implementando un ICIC mejorado (eICIC), en el que se tienen configuraciones en dominio de frecuencia, tiempo y potencia [14].

2.4.3 Gestión estática ICIC

El presente trabajo monográfico se enfoca en las técnicas de gestión estática ICIC, por lo tanto, se profundiza más en dicha técnica a fin de comprender su funcionamiento al ponerla en práctica en el simulador de red Atoll, ya que esta herramienta hace posible realizar este tipo de mitigación de interferencia.

La estrategia de coordinador de interferencia inter-celda utiliza el reúso de frecuencia en LTE variando la asignación de recursos físicos por celda. Esta estrategia toma en cuenta las variaciones de potencia de los RBs para su asignación en bordes y centros de celdas en algunos casos de configuración. A continuación, se describe el reúso de frecuencia empleado en ICIC [4]:

- Frequency Reuse 1 (FFR1): Los PRBs están disponibles para todas las celdas, la potencia no varía en el centro de la celda con respecto a las zonas de solapamiento. También, los RBs son compartidos por las tres celdas, o bien, no se tiene un número específico de recursos físicos por celda.
- En reuso 3 (FFR3): Los PRBs se encuentran divididos en 3 grupos y cada grupo es asignado a una celda dentro de un grupo de 3 celdas (sectores), este esquema a pesar de que reduce notablemente las interferencias implica una reducción drástica de las capacidades de cada celda al limitar los PRBs por cada una y podría no garantizar la calidad de servicio de throughput obtenido por los usuarios.
- Partial Reuse: Cada célula se divide estáticamente en zonas de centro de célula (CC) y de borde de célula (CE). La primera contiene los UEs cercanos al eNB, mientras que la segunda contiene UEs cercanos al borde de la celda. Al estar más cerca de las celdas vecinas y relativamente lejos de sus celdas eNBs servidoras, los UEs del borde de la celda experimentarán más ICI. Por lo tanto, el objetivo principal del Partial Reuse es proteger los RBs atribuidos a estos. Los UEs del centro de la celda también se denominan UEs de reutilización completa (FR) ya que su espectro asignado se utiliza según el modelo de reutilización de frecuencia-1 en las celdas vecinas. Los RBs asignados para los UEs en bordes de celda se denominan RBs de Reutilización Parcial (PR), ya que su uso en las celdas adyacentes se basa en el modo de reutilización de frecuencias-3.
- Soft Reuse: Toma en cuenta valores SINR de usuario. Este valor por UE brinda información sobre la calidad media del canal, las condiciones de radio y la ICI para el UE. No utiliza posiciones geográficas, sino valores SINR. Si la SINR media de un UE es inferior a un umbral de SINR predefinido, se considera un UE en malas condiciones de radio (BR); en caso contrario, se clasifica como UE en buenas condiciones de radio (GR). Los UE BR se conocen comúnmente como UE de borde de celda, mientras que los restantes se denominan UE de centro de celda. La potencia en bordes de celda es mayor que la potencia en el centro de celda en enlace descendente.

- FFR Time-Divided: Similar al concepto de Soft Reuse pero en el se busca la disminución de interferencias solamente utilizando una fracción de banda distinta en intervalos de tiempo distintos, pero no utiliza un nivel de potencia superior al de centro de celda.

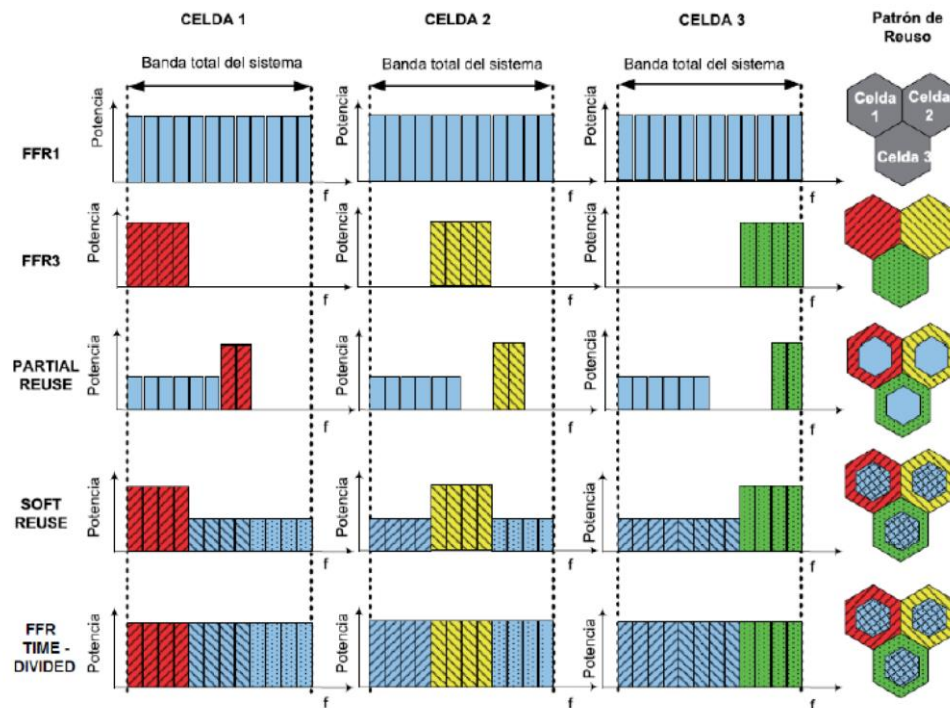
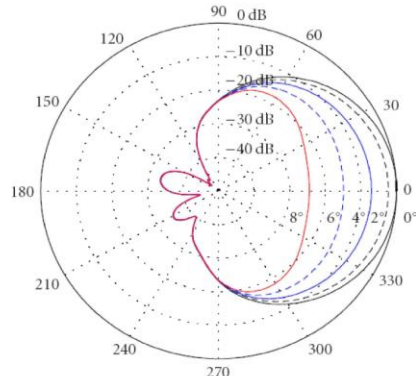


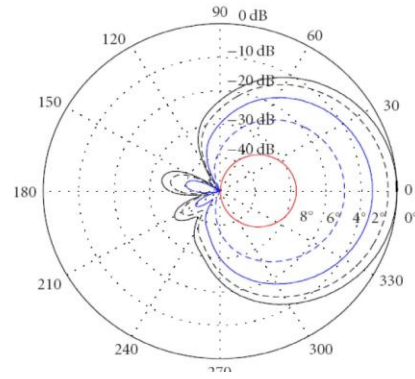
Figura 4. Posible reuso de frecuencia implementado en ICIC LTE [4].

2.4.4 Ángulo de inclinación de antenas por tilt eléctrico y mecánico

El ángulo de inclinación de una antena se define como el ángulo que forma el lóbulo de radiación principal de la antena con el horizonte. Este ángulo es a su vez la suma de dos ángulos de inclinación: el conseguido por medios mecánicos y el conseguido por medios eléctricos. Por medio de la forma mecánica se requiere visitar el sitio donde está ubicada la antena y hacer los cambios físicamente. Alternativamente, la inclinación de antena puede realizarse eléctricamente mediante el ajuste de la fase de los elementos radiantes de la antena, lo que puede controlarse remotamente mediante RET. En la siguiente figura se muestran los patrones de radiación que se obtienen para ambos casos.



(a). Ángulo mecánico



(b). Ángulo eléctrico

Figura 5. Esquema de inclinación de antena [15].

El ajuste del ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base es una de las técnicas más usadas para mejorar el aislamiento entre celdas o extender la cobertura de las mismas en redes celulares. Una configuración óptima del ángulo de inclinación minimiza la interferencia entre celdas vecinas (overlapping), evita conexiones con usuarios situados muy alejados de la celda (overshooting) ya que reduce a su vez las zonas donde convergen celdas vecinas. Mejora la cobertura de red mejorando incluso valores métricos de throughput y razón SINR. La configuración correcta del ángulo de inclinación de las antenas de una celda y el de sus vecinas es importante para asegurar que el nivel de señal es máximo dentro del área de servicio de las mismas y mínimo fuera de ellas [15].

2.4.5 Diversidad de antenas

Consiste en uso diversas antenas tanto en transmisión como recepción. Las técnicas de múltiples antenas aumentan en gran medida la tasa de transmisión de datos, incrementando la capacidad general de la celda, o un usuario en particular. Los arreglos de antenas evitan la interferencia multi-antena [16].

Las diversas configuraciones de diversidad espacial de antenas son:

- SISO (Una antena transmisora y una antena receptora)
- MISO (Múltiples antenas transmisoras y una antena receptora)
- SIMO (Una antena transmisora y múltiples receptoras)
- MIMO (Múltiples antenas receptoras y múltiples receptoras)

Esta última configuración, MIMO, se abordará principalmente como técnica de mitigación de interferencia en este trabajo.

2.4.6 MIMO

Se entiende por MIMO a un sistema de transmisión y recepción que usa más de una antena para enviar señal a más de una antena receptora, todo esto dentro de la misma frecuencia. Se aprovecha la propagación multi camino incrementando eficiencia espectral a través de diversidad de antenas. Puede explotar técnicas de diversidad y conformación de haces, teniendo un incremento en capacidad de eficiencia espectral.

2.4.7 SU-MIMO

La transmisión de SU-MIMO se da mediante recursos frecuencia-tiempo en un equipo de usuario, y permite a estos alcanzar valores pico en eficiencia espectral. SU-MIMO engloba técnicas de diversidad de transmisión, multiplexación espacial y formación de haces. Estas técnicas son soportadas por LTE, siendo el enfoque más común el multiplexado espacial.

El multiplexado espacial es una técnica reconocida para incrementar el throughput pico por usuario enviando múltiples tramas espaciales a través de múltiples antenas, separando estas tramas en el receptor en el procesamiento espacial [17].

2.5 Medición y Tipos de Mediciones

La captura de parámetros de red puede ser mediante dos tipos de medición: Pasiva o Activa. En el presente trabajo, se aborda principalmente la Medición Activa, ya que se realizará un Drive Test para una posterior calibración de modelo de propagación estándar utilizando el software de simulación Atoll. A continuación, se describen los dos tipos de medición [18].

2.5.1 Medición Pasiva

Los paquetes de prueba de medición se envían desde los sistemas de administración, con el fin de medir métricas de rendimiento como el retardo, fluctuación de fase y pérdida de paquetes. Aunque este tipo de mediciones tiene una desventaja, no se puede medir o evaluar la calidad a nivel de un usuario final o

grupo de usuarios. Tampoco se pueden medir las variaciones de un indicador dentro de la zona de cobertura de un nodo en particular.

2.5.2 Medición Activa

Se realiza a través del uso de dispositivos físicos, tales como equipos de radio frecuencia, escáneres especiales para este tipo de medición, con el fin de obtener mediciones realmente precisas, entre estos se encuentran las mediciones por sondas, destinados a clientes promedios, geográficamente ubicado en un mismo lugar, mientras que en el drive test se puede hacer un barrido de mediciones de señal inalámbrica.

2.5.3 Drive Test.

Se utiliza un equipo de medición de radiofrecuencia a fin de recopilar información de parámetros de red. Puede simular el comportamiento de un equipo de usuario, sobre el uso de los servicios de red, como también en modo Idle o inactivo. El drive test puede llevarse a cabo en movimiento, haciendo un barrido de red en entornos Indoor (edificios) y Outdoor (zona urbana, rural).

2.6 Herramienta para diseño de la red de tecnología Inalámbrica

Para diseñar una red de radio, se deben tomar en cuenta datos como mapas, ubicación de las antenas, alturas de las zonas geográficas, tipos de estructuras presentes en el terreno. Por lo tanto, este proyecto será realizado con el software de simulación Atoll el cual nos provee de muchas herramientas para simular la red LTE.

2.6.1 Atoll

Atoll fue diseñado por la empresa Forsk. Es una plataforma de diseño y optimización de redes inalámbricas, siendo un software abierto, escalable, flexible, sirviendo tanto para el diseño de una nueva red, así como la densificación y optimización de la misma [19]. En Atoll podemos tener predicciones de señal como también simulaciones de escenarios de red con carga de tráfico. Algunas predicciones que se pueden realizar por nivel de señal son:

- Cobertura por Nivel de Señal

- Cobertura por Transmisor
- Zona de solapamiento
- Análisis de Señal Efectiva
- Por calidad de señal
- Cobertura por Nivel de C/(I+N)
- Análisis del Área de Servicio
- Análisis del Área de Servicio Efectiva
- Cobertura por Throughput
- Cobertura por Indicador de Calidad

2.6.2 Formula de Standard Propagation Model SPM

Atoll toma en consideración diferentes modelos de estimación de pérdidas. Para este proyecto se trabajará con el modelo SPM, por lo tanto, no centraremos en su fórmula para calcular la pérdida por trayectoria. La siguiente ecuación es la que toma el software de planificación de redes para predicciones de niveles de señal.

$$L_{model} = K_1 + K_2 \log(d) + K_3 \log(H_{T_{eff}}) + K_4 * DiffractionLoss + K_5 \log(d) * \log(H_{T_{eff}}) \\ + K_6(H_{R_{eff}}) + K_7 \log(H_{R_{eff}}) + K_{cluster}f(cluster)$$

Ecuación 2. Pérdidas por trayecto del modelo SPM [19].

Donde:

K_1 = Constante offset (dB).

K_2 = Factor de multiplicación para $\log(d)$.

d = Distancia entre receptor y transmisor (m)

K_3 = Factor multiplicador para $H_{T_{eff}}$.

$H_{T_{eff}}$ = Altura efectiva de antena de transmisor (m).

K_4 = Factor multiplicador para el cálculo de difracción.

K_5 = factor multiplicador para $\log(d) * \log(H_{T_{eff}})$.

K_6 = factor multiplicador para $H_{T_{eff}}$.

K_7 = Factor multiplicador para $\log(H_{T_{eff}})$.

$H_{R_{xeff}}$ = Altura efectiva de receptor (m).

$K_{clutter}$ = factor multiplicador para $f(clutter)$.

$f(clutter)$ = Promedio de pérdidas.

2.6.3 Google Earth

Es un sistema de información geográfica que permite visualizar múltiple información topográfica basado en imágenes satelitales. Además, se utilizará para observar de manera gráfica las simulaciones de red, siendo exportadas desde Atoll. Por medio de esta herramienta se realizará la creación de una ruta de drive test en zonas de alto tráfico de usuarios.

Capítulo III. Diseño Metodológico

El diseño metodológico o metodología es una estrategia utilizada con el fin de obtener información requerida por el estudio, además presentar el desarrollo de la metodología de trabajo para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, teniendo en cuenta los parámetros de simulación, el proceso de desarrollo y el análisis de la simulación.

El método que se utilizará en esta investigación es de tipo cuantitativo experimental, dado que se realizará una calibración de modelos de estimación de pérdidas y la implementación de estrategias de mitigación de interferencias en escenarios de red.

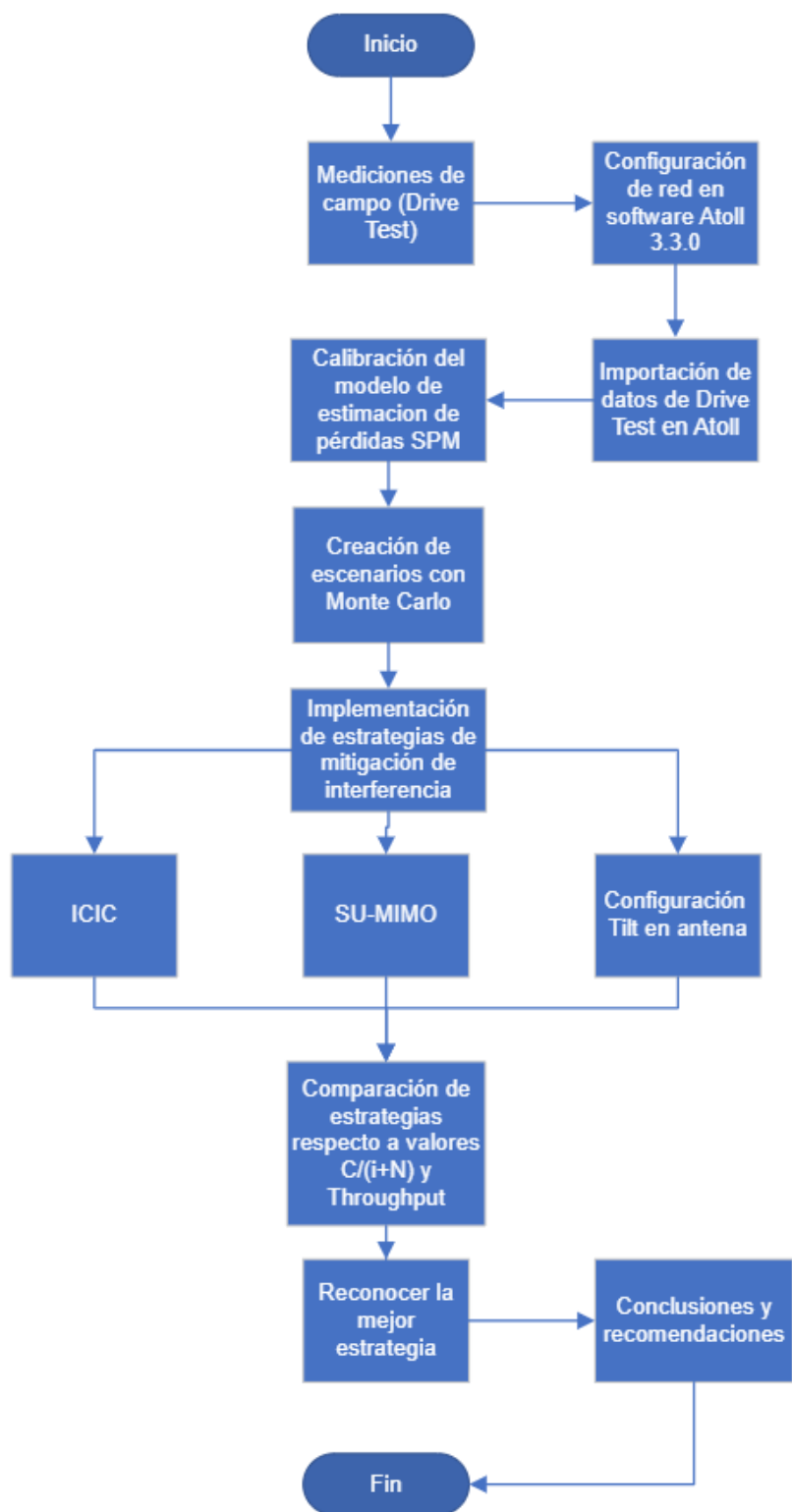
Etapas 1: Se realiza un Drive Test de tipo idle y activo para recolectar datos de red tales como RSRP, RSRQ, CQI, SNR y throughput utilizando un scanner de Radio Frecuencia sobre una ruta establecida, con el fin de identificar escenarios donde se encuentre interferencia inter-celda.

Etapas 2: Se investigan parámetros de red LTE, por ejemplo: frecuencia de operación, azimut o dirección, altura de la antena y potencia de transmisión para su configuración en el software de simulación Atoll. Se considera la ubicación de sitios de la red existente y se realizará la importación de información de drive test en el módulo de Atoll CW Measurements para la calibración del modelo de estimación de pérdidas SPM.

Etapas 3: Se realizará la creación de escenarios de red a través de simulaciones de Monte Carlo en los cuales se implementen de estrategias de mitigación de interferencia para obtener los valores de $C/(i+N)$ y throughput para una futura comparación de los resultados y de esta manera observar la eficiencia de las estrategias.

Etapas 4: Con el apoyo de histogramas y tablas se compararán los niveles de $C/(i+N)$ y throughput obtenidos antes y después de aplicar las estrategias determinando así la mejor estrategia para la red LTE en el Municipio de Managua para cada escenario.

3.1 Diagrama de elaboración de diseño metodológico.



3.2 Elaboración de drive test

Este apartado tiene como objetivo realizar de un drive test en modo activo y modo Idle en la banda de 1900 MHz en una zona de alto tráfico en el municipio de Managua con el fin de obtener información de parámetros de la red LTE como RSRP, CQI, SINR, throughput y RSRQ, mismos que serán utilizados para conocer el rendimiento de la red actual y delimitar las zonas más afectadas en los niveles de interferencia SINR.

En el caso específico del drive test en modo activo, este se realizará mediante la descarga de datos donde puede ser más evidente la presencia de interferencias a lo largo de la ruta, de esta manera se evaluarán los resultados SINR y se identificarán las zonas más afectadas en el trayecto. Es importante resaltar las zonas con mayores niveles de interferencia SINR ya que es donde se puede obtener más afectaciones en la velocidad de conexión [20].

Para el Drive test en modo Idle no se realizará descarga de datos, por lo tanto, no se obtendrán resultados de throughput. El resultado de los niveles de señal RSRP obtenido será utilizado para la importación de drive test en el software de Atoll y calibración de modelo SPM para futuras predicciones.

Para facilitar la comprensión de los resultados de Drive test se realizará un resumen mediante histogramas para los parámetros de interés en modo Idle y modo activo. Los histogramas podrán ser utilizados para realizar una comparación de la red antes y después de su optimización.

Para considerar los niveles de los parámetros como bueno, regular o malo se utilizará la referencia [21], donde se definen los niveles por medio de tablas para los parámetros RSRP, RSRQ, SINR. Para el análisis de throughput se utilizó la referencia [22].

Los temas a considerar en este apartado son los siguientes:

- Site survey.
- Ruta de drive test.
- Drive test.
- Post procesamiento.

3.3 Site survey

Como punto de partida al Drive test es necesario conocer los sitios que se vean involucrados en el estudio, conociendo parámetros como ubicación geográfica de los sitios, sectores por sitio, azimut, tipo de antena y altura. Para este proyecto el resultado del site survey para un drive test en una zona de alto tráfico en el municipio de Managua, muestra 16 sitios los cuales cada uno incluye la información de los parámetros antes mencionados. Cada uno de los sitios cuenta con 3 sectores operando en la banda 2 de frecuencia. Una vez filtrados estos sitios se procede a la creación de una ruta para realizar las mediciones de campo. La información de site survey se muestran en la tabla 4.

En la tabla 4 se muestran los parámetros por cada sector que compone un sitio. Se tiene un total de 48 sectores con información de ubicación geográfica, orientación de la antena, altura de antena, identificador de celda, inclinación de la antena, entre otros. Es muy importante tomar en cuenta los identificadores de celda ya que en los resultados de Drive test se filtrarán las mediciones por cada PCI. Estas mediciones por celda serán utilizadas para la calibración de la modelo de estimación de pérdidas.

Tabla 4. Site survey. Elaboración propia.

Nobe B	Cell name	Latitude	Longitude	Physical cells identifier	Frequency band	Earfcdnl	Azimuth	Electrical tilt	Mechanical tilt	Height
MN01	LMN01A	12.121000	-86.262889	93	2	1125	50	4	3	42
MN01	LMN01B	12.121000	-86.262889	94	2	1125	190	4	2	42
MN01	LMN01C	12.121000	-86.262889	95	2	1125	280	5	3	42
MN02	LMN02A	12.124250	-86.272969	210	2	1125	60	4	3	25
MN02	LMN02B	12.124250	-86.272969	211	2	1125	160	4	2	25
MN02	LMN02C	12.124250	-86.272969	212	2	1125	300	4	3	25
MN03	LMN03A	12.133333	-86.274806	96	2	1125	40	4	3	42
MN03	LMN03B	12.133333	-86.274806	97	2	1125	180	6	4	42
MN03	LMN03C	12.133333	-86.274806	98	2	1125	310	4	2	42
MN04	LMN04A	12.141833	-86.258083	120	2	1125	55	5	1	36
MN04	LMN04B	12.141833	-86.258083	121	2	1125	160	6	1	36
MN04	LMN04C	12.141833	-86.258083	122	2	1125	280	6	1	36
MN05	LMN05A	12.127778	-86.257500	435	2	1125	30	4	4	36
MN05	LMN05B	12.127778	-86.257500	436	2	1125	160	4	2	36
MN05	LMN05C	12.127778	-86.257500	437	2	1125	260	4	3	36
MN06	LMN06A	12.116806	-86.275167	267	2	1125	80	3	1	12
MN06	LMN06B	12.116806	-86.275167	268	2	1125	200	3	1	12
MN06	LMN06C	12.116806	-86.275167	269	2	1125	300	3	1	12
MN07	LMN07A	12.141556	-86.266778	57	2	1125	30	4	0	26
MN07	LMN07B	12.141556	-86.266778	58	2	1125	140	4	0	26
MN07	LMN07C	12.141556	-86.266778	59	2	1125	310	2	0	26
MN08	LMN08A	12.124944	-86.268167	318	2	1125	50	3	2	23
MN08	LMN08B	12.124944	-86.268167	319	2	1125	170	2	1	23

Nobe B	Cell name	Latitude	Longitude	Physical cells identifier	Frequency band	Earfcndl	Azimuth	Electrical tilt	Mechanical tilt	Height
MN08	LMN08C	12.124944	-86.268167	320	2	1125	310	4	3	23
MN09	LMN09A	12.122111	-86.254500	90	2	1125	20	4	0	24
MN09	LMN09B	12.122111	-86.254500	91	2	1125	140	5	0	24
MN09	LMN09C	12.122111	-86.254500	92	2	1125	300	5	0	24
MN10	LMN10A	12.130694	-86.263639	354	2	1125	20	2	2	15
MN10	LMN10B	12.130694	-86.263639	355	2	1125	150	3	1	15
MN10	LMN10C	12.130694	-86.263639	356	2	1125	220	3	1	15
MN11	LMN11A	12.134050	-86.256260	321	2	1125	50	3	3	28
MN11	LMN11B	12.134050	-86.256260	322	2	1125	150	3	0	28
MN11	LMN11C	12.134050	-86.256260	323	2	1125	300	3	3	28
MN12	LMN12A	12.123306	-86.273972	456	2	1125	85	3	0	16
MN12	LMN12B	12.123306	-86.273972	457	2	1125	175	3	0	16
MN12	LMN12C	12.123306	-86.273972	458	2	1125	290	5	0	16
MN13	LMN13A	12.117722	-86.258556	249	2	1125	350	7	0	24
MN13	LMN13B	12.117722	-86.258556	250	2	1125	110	3	0	24
MN13	LMN13C	12.117722	-86.258556	251	2	1125	210	3	0	24
MN14	LMN14A	12.131194	-86.280083	48	2	1125	0	7	1	30
MN14	LMN14B	12.131194	-86.280083	49	2	1125	160	4	2	30
MN14	LMN14C	12.131194	-86.280083	50	2	1125	260	7	1	30
MN15	LMN15A	12.128211	-86.272792	69	2	1125	60	7	0	36
MN15	LMN15B	12.128211	-86.272792	70	2	1125	140	5	0	36
MN15	LMN15C	12.128211	-86.272792	71	2	1125	250	6	0	36
MN16	LMN16A	12.131772	-86.269796	231	2	1125	30	3	3	27
MN16	LMN16B	12.131772	-86.269796	232	2	1125	90	2	3	27
MN16	LMN16C	12.131772	-86.269796	233	2	1125	220	2	4	27

3.4 Ruta de drive test

Para tener una mejor referencia antes de la creación de la ruta, se creó un archivo .kmz con la herramienta de Google Earth, donde se cargó las ubicaciones de los sitios y los sectores con los azimuts correspondientes. La siguiente figura muestra la ruta que será utilizada para realizar las mediciones de campo. Para la creación de la ruta se consideró las zonas con mayor tránsito de usuarios dentro del clúster de los 16 sitios teniendo una longitud de 40.9 Km.



Figura 6. Ruta de Drive. Elaboración propia.

La ruta se ha diseñado tomando en consideración la zona. Se realizaron trayectos en calles principales, zonas universitarias y centros comerciales. Esta zona es céntrica en el municipio de Managua, por lo que la hace una zona altamente comercial. También, se consideró dibujar un trayecto hacia la rotonda Centroamérica ya que esta calle se dirige a la conocida carreta a Masaya, muy conocida por el alto tráfico de usuarios. Lo antes mencionado justifica la elección de la ruta por la alta demanda de los servicios de datos móviles.

3.5 Drive test

Drive Test es un procedimiento mediante el cual los operadores realizan recorridos en vehículos por las calles de la zona donde se quiere evaluar el desempeño de un eNodeB. El drive test se realiza para medir la cobertura y desempeño de una red celular en alguna tecnología. Cada una de estas tiene parámetros a medir que serán interpretados para tomar decisiones de modificación de parámetros, implementaciones o configuraciones en los eNodeBs. Mediante el drive test se realizan verificaciones de cobertura, calidad de servicio y pruebas de interferencia [20].

Los drives test brindan la información necesaria para el planeamiento de la radio cobertura en los sistemas de comunicación móvil. La forma más fácil de ejecutar a menudo drive test en LTE / LTE-A lo suficientemente detallado es utilizando un teléfono LTE (UE) que esté equipado con las capacidades para medir parámetros como los niveles de potencia recibidos; la calidad de la señal y otros valores de parámetros transferido entre el UE y el eNodeB [12].

3.6 Equipo de recepción UE

Equipo de usuario es un dispositivo que permite al usuario acceder a los servicios de la red. El equipo de usuario puede incluir una tarjeta inteligente (Universal Integrated Circuit Card, UICC) que contenga la información necesaria para permitir la conexión a la red y la utilización de sus servicios. Puede conectarse a la red de telefonía móvil a través de un eNodeB y una interfaz radio [23].

	Category							
	Release 8/9/10/11					Release 10/11 only		
	1	2	3	4	5	6	7	8
Downlink peak rate [Mbit/s]	10	50	100	150	300	300	300	3000
Uplink peak rate [Mbit/s]	5	25	50	50	75	50	150	1500
Maximum downlink modulation					64QAM			
Maximum uplink modulation		16QAM			64QAM	16QAM	64QAM	
Max number of layers for downlink spatial multiplexing	1	2			4	Signaled separately		

Figura 7. Categorías de equipos de usuario [24].

Se han definido diferentes categorías de terminal móvil dependiendo de la capacidad MIMO, de la máxima velocidad de transmisión de pico y de la capacidad de procesamiento del terminal móvil [23]. En la figura 7 se resumen las características más relevantes de las categorías de equipos de usuarios. Se definen según el release por velocidades pico relacionada a la modulación por medio de la cual se alcancen las velocidades presentadas.

3.7 Aplicación Tems Pocket

TEMS™ Pocket es una herramienta portátil para la verificación, el mantenimiento y la resolución de problemas de redes móviles, así como para tareas básicas de planificación celular. Integrado en un teléfono móvil o tableta comercial, TEMS Pocket recopila mediciones y eventos y los presenta en la pantalla del dispositivo. Las mediciones pueden almacenarse para su posterior análisis en otros productos como TEMS™ Discovery y TEMS™ Investigation [25].



Figura 8. Interfaz gráfica de la aplicación Tems Pocket [25].

La figura 8 muestra la interfaz gráfica de usuario de la aplicación de Tems Pocket. En la página principal de la aplicación se muestra los niveles RSRP de la celda actual conectada con el dispositivo y los niveles de los sectores vecinos a la celda. Se muestra el identificador de la celda PCI, canal de frecuencia, entre otros.

Tems Discovery permite introducir métricas al igual que el post-proceso para el análisis de las mediciones en campo. Soporta tecnologías como GSM, GPRS, EDGE, WCDMA, HSPA, HSPA + y GAN (UMA), CDMA, WiMAX, LTE y LTE-A [12]. Esta herramienta será utilizada para la obtención de información resumida por medio de la cual se realicen histogramas para los parámetros de la red LTE.

3.8 Descripción del drive test

El Drive Test puede realizarse en horas con mayor cantidad de tráfico 7 – 8 am, 12 pm y 6 pm [12]. Estos horarios son conocidos como busy hours y es en los cuales podemos tener una mejor captura del rendimiento de la red. El tiempo para realizar un Drive depende de la extensión de la ruta y los trayectos de medición. Para este proyecto el Drive Test fue realizado desde las 8 am hasta las 12 pm con una velocidad promedio de 45 Km/h, es importante destacar el factor de la velocidad de movilidad ya que esto ayuda a tener más precisión en el Drive Test [12].

Herramientas utilizadas en el Drive test:

- Teléfono móvil Samsung Galaxy S21.
- Aplicación móvil Tems Pocket.
- Computadora HP Intel core i5.
- Software Tems Discovery.

Para el proceso de Drive test se utilizó la aplicación móvil Tems Pocket, la cual ofrece mediciones en tiempo real de los parámetros de las redes móviles, efectúa pruebas de rendimiento de la red, como carga y descarga de archivos, pruebas de conectividad y peticiones web [26]. En la aplicación Tems Pocket se cargó la ruta para guiar el drive test y el dispositivo móvil se bloqueó para la tecnología de LTE, de esta manera no se obtendrían eventos de cambio de tecnología en zonas afectadas por posibles interferencias y baja calidad del servicio.

Para visualizar los datos recolectados por la aplicación de Tems Pocket se utilizó una computadora HP con procesador Intel core i5 y el software Tems Discovery por medio del cual podemos tener lectura de las mediciones de campo utilizando mapas digitales. Tems Discovery provee características como: la cantidad de muestras

totales en la ruta, promedio de muestras por niveles, indicadores de rendimiento en el cual se encuentra valores de Throughput del PDSCH y BLER del canal PDSCH. También se puede realizar un resumen estadístico de SINR, RSRP y RSRQ.

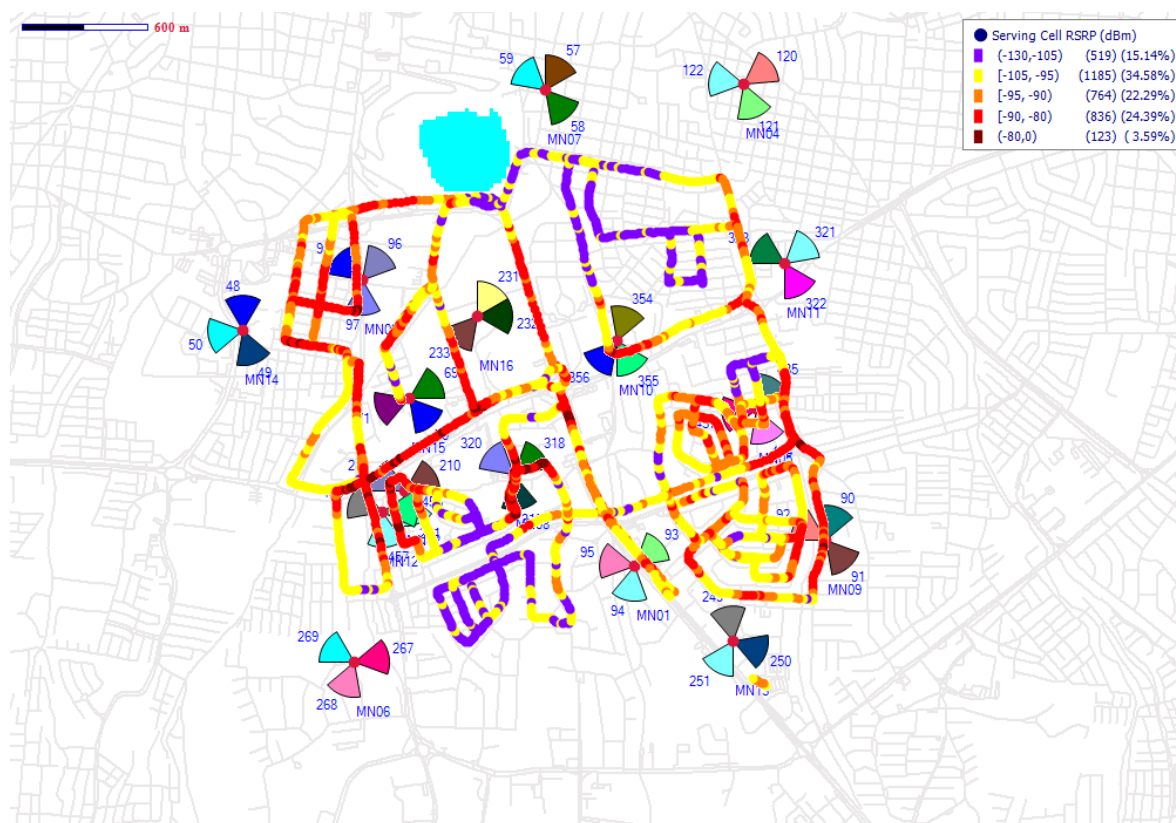


Figura 9. Drive Test Nivel de intensidad de señal o RSRP herramienta Tems Discovery.
Elaboración propia.

En la figura 9 se muestran los niveles de intensidad de señal o RSRP obtenidos en el Drive test a lo largo de la ruta. El drive test se cargó en la herramienta Tems Discovery, la cual nos permite ver los resultados en un mapa digital cargado, como los sitios con su identificador de celda, las muestras capturadas y la leyenda con la cantidad de muestras según el nivel de señal.

3.9 Post-Procesamiento

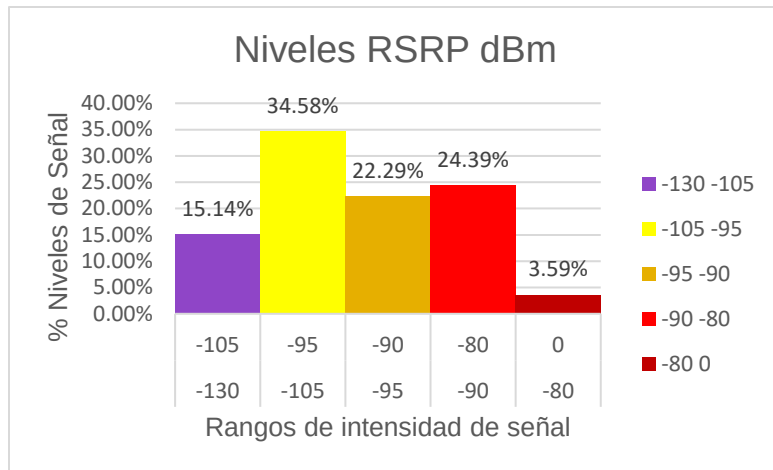
El post-proceso es una actividad que se realiza con los resultados obtenidos en el drive test para los diferentes eventos positivos y negativos. Los eventos incluyen Drop Call, Bloc Call, Sobrepropagación, overshooting, Call Setup, Handover Fail, Intra Frequency Handover Fail, vecinas no declaradas, niveles de RSRP, RSRQ, BLER, SIRS, CQI, Throughput de DL y UL entre otros [12].

3.9.1 Resultado de Post-Procesamiento

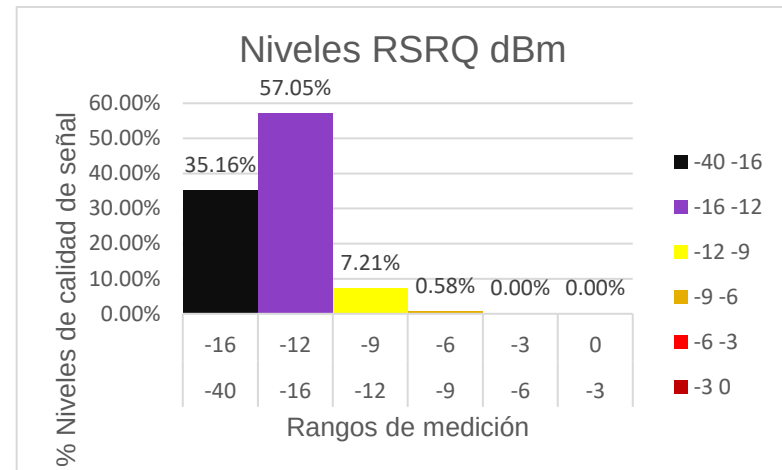
Se obtuvo un total de 3,123 muestras a lo largo de la ruta. El post proceso nos ayudará a filtrar la información por muestras según los niveles de señal obtenidos por cada sector. Esto influirá en la calibración del modelo de estimación de pérdidas SPM ya que será necesario importar las mediciones en los sectores correspondientes de la red que será configurada en Atoll.

Se generaron histogramas por cada drive test modo Idle y modo activo con los resultados obtenidos en los parámetros SINR, RSRP, RSRQ y Throughput. Para los resultados en modo activo en SINR se resumirán las muestras con buenos y malos niveles como las zonas más afectadas. Este mismo se realizará con el throughput obtenido.

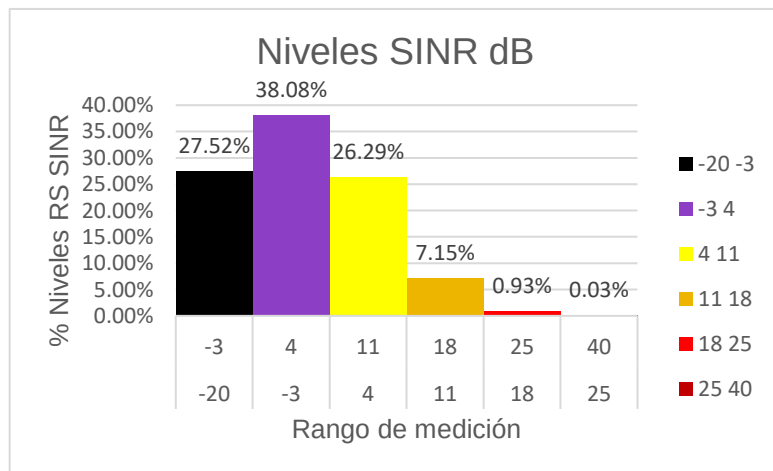
3.10 Análisis de resultados con Tems Discovery



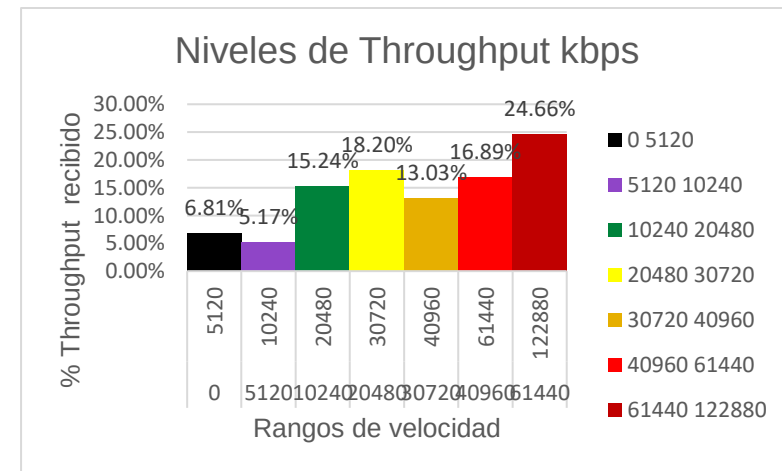
Histograma 1. Niveles RSRP modo activo.



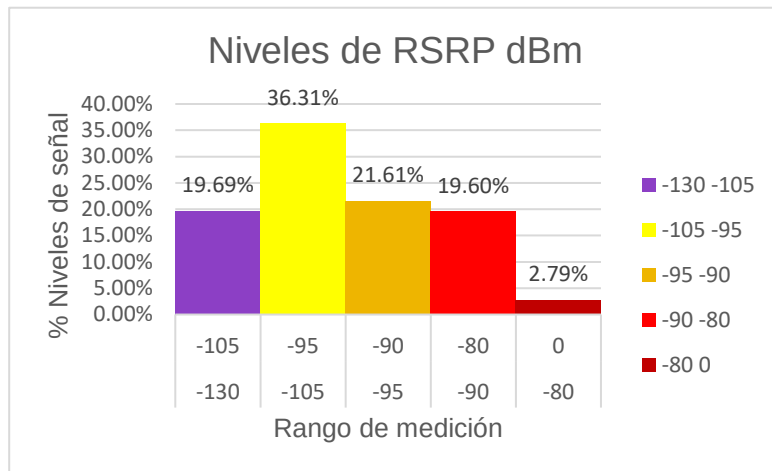
Histograma 2. Niveles RSRQ modo activo.



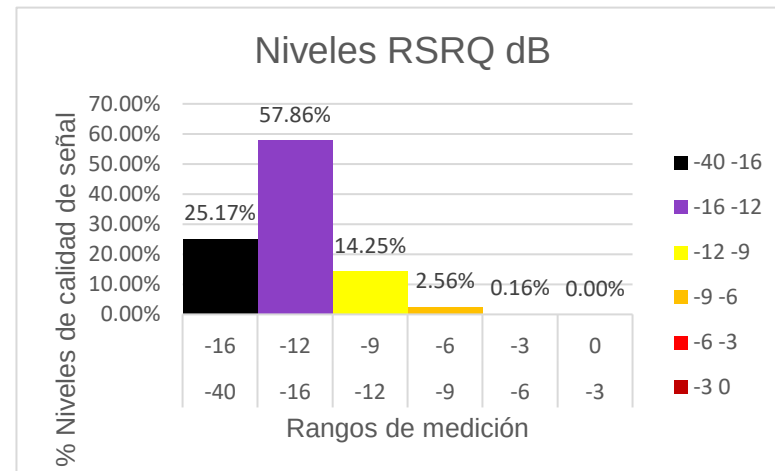
Histograma 3. Niveles SINR modo activo.



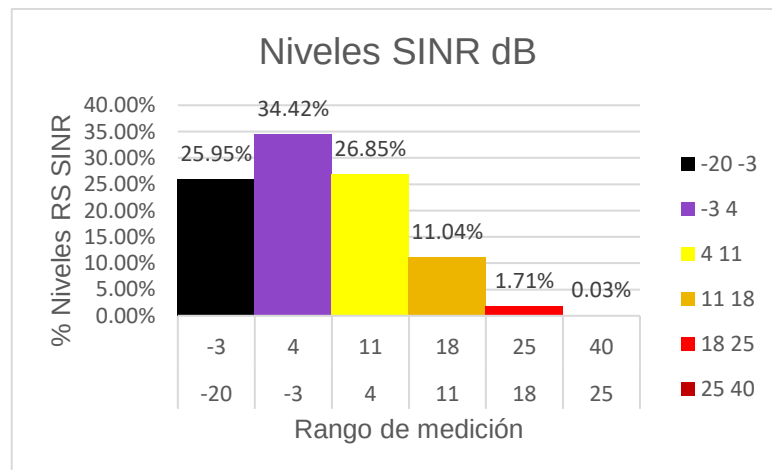
Histograma 4. Niveles de Throughput.



Histograma 5. Niveles RSRP modo Idle.



Histograma 6. Niveles RSRQ modo Idle.



Histograma 7. Niveles SINR modo Idle.

A continuación, se realiza una explicación más a fondo de los histogramas de SINR y throughput obtenidos del reporte anterior de drive test. En las mediciones de SINR en drive test modo activo se obtuvo niveles mayores a 18 dB con un 0.96%, las muestras que se encuentran en este rango son excelentes niveles de SINR, donde la interferencia no afecta a los usuarios ubicados en las zonas donde se reciban estos niveles. Para el caso de las muestras entre los 11 dB a 18 dB se obtuvo un 7.15%, las muestras que se encuentran en este rango están en buenos niveles de SINR. Para el rango de 4 dB a 11 dB tenemos un 26.29%, hasta este punto se recibe mayor presencia de interferencias que puede incurrir en el deterioro del servicio. Por último, aquellas muestras menores a 4 dB se consideran zonas con alta incidencia de interferencias. El porcentaje en este rango es de 65.6% del total de las muestras.

En las mediciones para el parámetro SINR en el drive test modo Idle se obtuvo niveles mayores a 18 dB con un 1.74%, estos son excelentes niveles para este parámetro, por lo tanto, del área total se tiene este porcentaje de muestras. Para las muestras de 11 dB a 18 dB se obtuvo un 11.04% en toda la ruta, las muestras que se encuentran en este rango son consideradas en buenos niveles. Para el rango de 4 dB a 11 dB se obtuvo un 26.85%, ya en este rango se tiene mayor presencia de interferencias. Los niveles obtenidos menores a 4 dB son donde se encuentra la mayor afectación de interferencia, en este rango se obtuvo un 60.37%.

Para el análisis de los resultados de throughput debemos considerar las velocidades pico para LTE con una única portadora. La velocidad para enlace downlink puede llegar hasta 150 Mbps y para el enlace uplink hasta 50 Mbps. En estas velocidades no se considera la estrategia de multiplexación como MIMO. Por ejemplo, con una configuración MIMO 2X2 podemos alcanzar velocidades de hasta 300 Mbps [23].

En los resultados se muestra que un 24.66% del total de las muestras se encuentran en un rango de 61.44 Mbps a 122.88 Mbps, en este intervalo se tendrá buen servicio en la descarga de datos y demandas de ancho de banda. Para el rango de 40.9 Mbps a 61.44 Mbps se obtuvo un 16.89% del total de las muestras, los usuarios en este rango pueden utilizar el servicio aún sin interrupciones. Para el rango de 30.7 Mbps a 40.9 Mbps se obtuvo 13.03%, en este punto ya puede haber incidencias de

factores que deterioran el servicio en la red como interferencias, huecos de cobertura de algún sitio próximo, entre otros. Las muestras por debajo de 30.7 Mbps no se acerca a lo que LTE está dispuesto a entregar, se obtuvo un porcentaje del 45.42%, en estas zonas donde se entrega esta velocidad se deben de considerar estrategias para mejorar los niveles.

Tabla 5. Comparación entre los niveles SINR entre Drive test modo activo y modo Idle. Elaboración propia.

Nivel (dB)	SINR en modo Idle (%)	SINR en modo activo (%)	Descripción
>= 18	1.74	0.96	Excelente
11 a 18	11.04	7.15	Excelente
4 a 11	26.85	26.29	Bueno
=< 4	60.37	65.6	Malo

Como se observa en la tabla 5, durante las mediciones de campo se tiene como resultado que al descargar datos en el dispositivo móvil se presentaron más afectaciones en los niveles SINR. Para el drive test en modo activo se obtuvo un porcentaje de 65.6% para valores malos del parámetro SINR, mientras que en el drive test en modo Idle (sin descarga) se obtuvo un 60.37% del total de las muestras. Referencia utilizada para interpretación de las muestras [21].

3.11 Representación de SINR para drive test modo activo con TEMS

Discovery

Con la ayuda de la herramienta Tems Discovery se visualizan los resultados de SINR en el drive test. Podemos ahora identificar las zonas más afectadas en el trayecto.

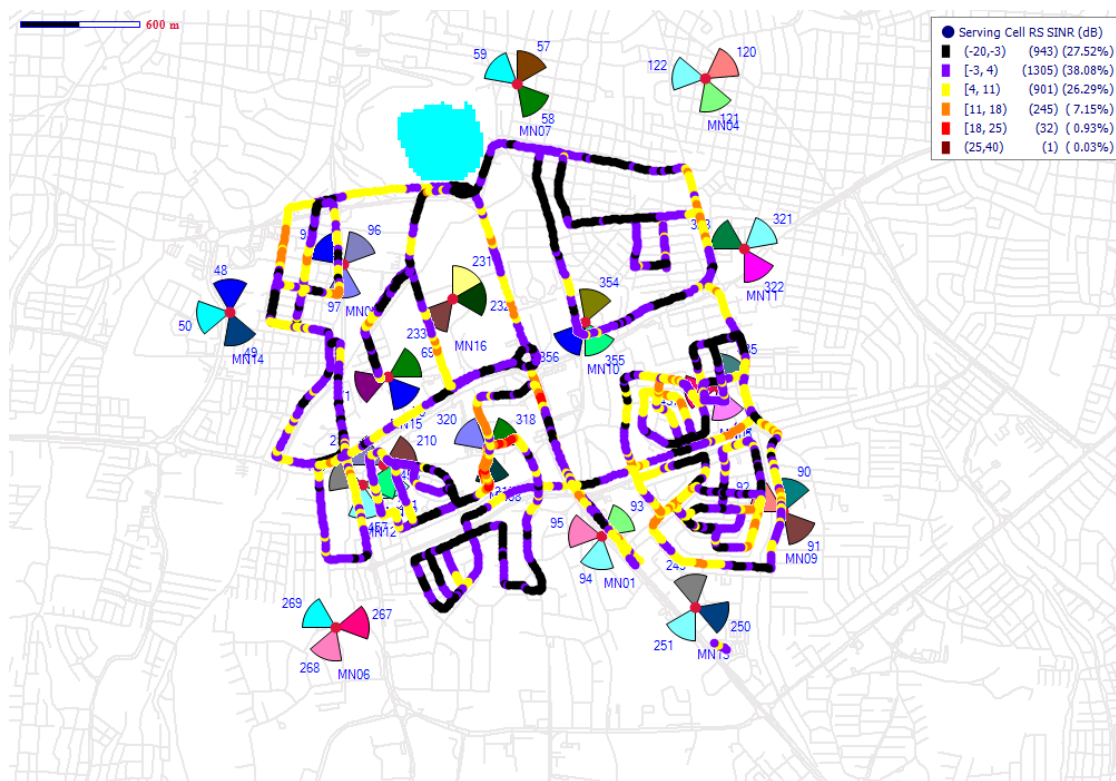


Figura 10. Niveles SINR drive test modo activo. Elaboración propia.

En la figura 10 se muestran zonas con bajos niveles de SINR desde los rangos 4 dB a -3 dB y de -3 dB a -20 dB, estos niveles se representan con los colores según la leyenda. La presencia de estos bajos niveles SINR en el drive test es evidente ya que en la mayor parte de la ruta se reciben muestras en estos rangos.

3.12 Representación de Throughput con TEMS Discovery

Mediante la representación que obtenemos del throughput podemos identificar las zonas donde se tiene bajos niveles de descarga. La siguiente figura nos ayudará a identificar dichas zonas.

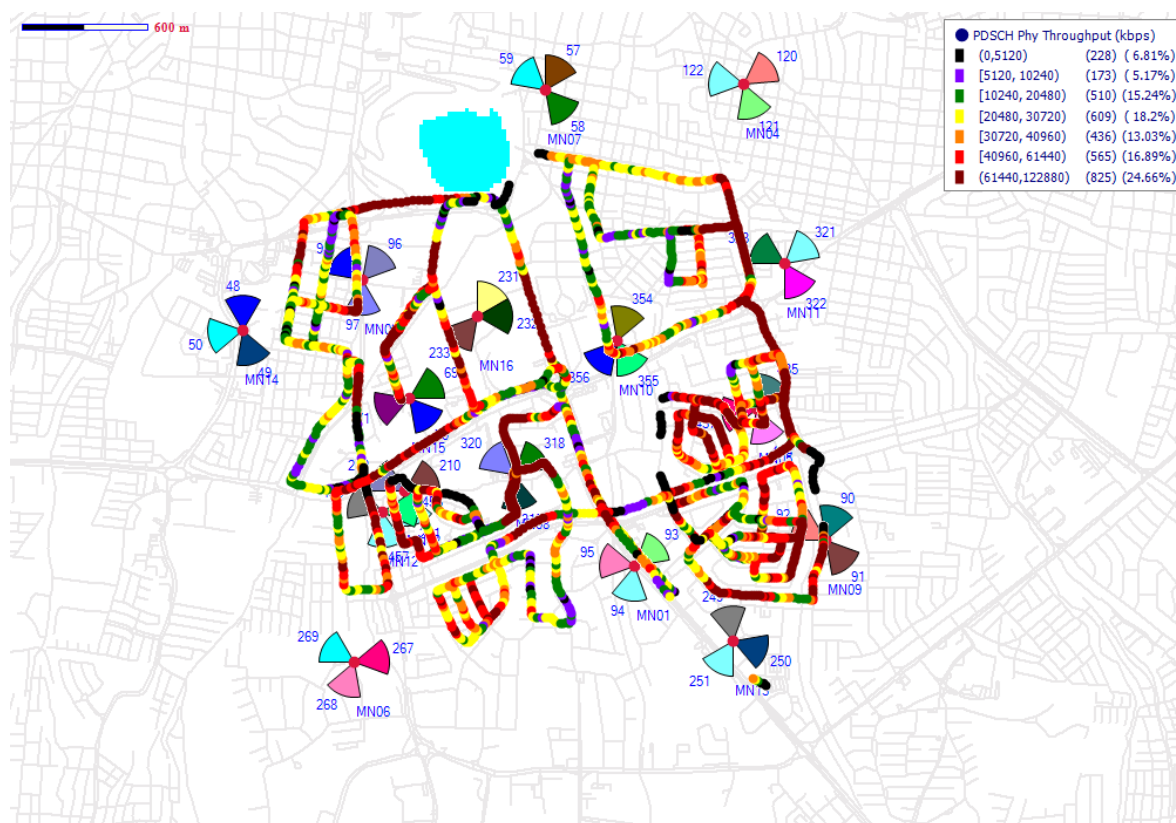


Figura 11. Niveles Throughput drive test modo activo. Elaboración propia.

Las zonas de interés en la figura 11 son aquellas donde se vea comprometido el throughput obtenido en niveles de descarga muy inferiores. En este caso las muestras con colores amarillo, verde, celeste y negro pueden ser consideradas para mejorar los niveles al optimizar la red en Atoll, esto sin comprometer los buenos niveles de descarga que ya existen en diversas zonas.

Es importante considerar las velocidades esperadas en el throughput ya que estas velocidades pueden variar según el tipo de canalización que se esté utilizando [23]. Como se muestra en la siguiente figura se tienen 2 velocidades, tanto la velocidad pico como la velocidad bruta. Según [23] de la velocidad bruta (Mb/s) que puede ser recibida por un equipo de usuario es el resultado de la diferencia del 15% de la velocidad pico con si misma según la canalización.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Velocidad de Pico Total (Mb/s)	$\cong 6$	$\cong 15$	$\cong 25$	$\cong 50$	$\cong 75$	$\cong 100$
Velocidad de pico bruta de usuario (Mb/s) (15% de los recursos destinados a control y señalización)	$\cong 5,1$	$\cong 12,8$	$\cong 21$	$\cong 42,5$	$\cong 63,7$	$\cong 85$

Figura 12. Velocidad pico y velocidad bruta según el canal utilizado [23].

3.13 Identificación de zonas con niveles de interferencia

Para realizar esta sección hemos tomado dos zonas donde se obtuvo bajos niveles de SINR para observar las afectaciones sobre throughput en la red. Como referencia se tomó el sitio MN10 donde se visualizó que en uno de los trayectos de medición muestra valores SINR menores a -3dB. En el área marcada con un círculo se observan mediciones SINR entre los niveles 4 dB a 11 dB y 11 dB a 18 dB, para esta zona se obtuvo un nivel de descarga en el rango de 61.4 Mbps a 40 Mbps y de 61.4 Mbps a 122.8 Mbps.

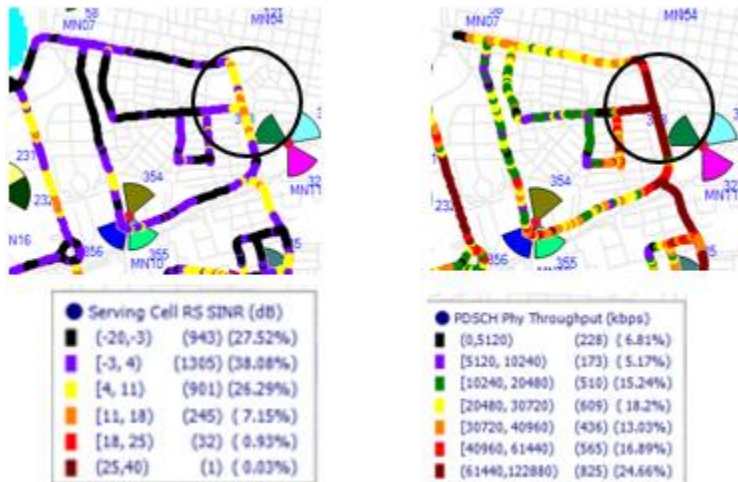


Figura 13. Relación de SINR y Throughput. Elaboración propia.

Para la nueva área marcada en la siguiente figura se obtuvo valores SINR entre 4 dB a -3 dB, sin embargo, se obtiene más muestras con valores entre -3 dB a -20 dB representado por el color negro. Para esta área se obtuvieron valores de throughput menores a 30 Mbps.

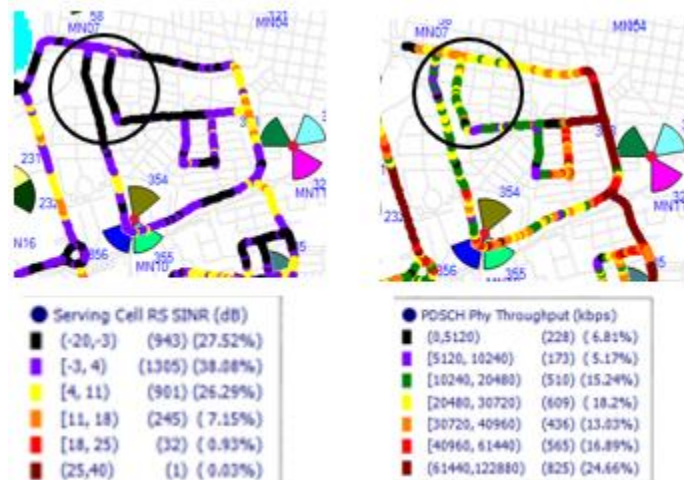


Figura 14. Relación de SINR y Throughput. Elaboración propia.

Como conclusión podemos destacar que aquellas áreas donde se obtuvo un SINR mayor a 4 dB es donde se consiguen los mejores niveles de descarga. Para áreas con valores de SINR menores a 4 dB la velocidad de descarga se ve afectada, incluso cuando hay buena cobertura por sectores cercanos. Si la red es optimizada de tal manera que se mejoren los niveles de SINR o throughput los usuarios pueden alcanzar mejores niveles de velocidad de datos.

Capítulo IV. Creación de escenarios de red y aplicación de estrategias

4.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo crear y configurar una red LTE en el software de simulación Atoll. La configuración tomará la información obtenida por el site survey para una red ubicada en una zona de alto tráfico. Se realizará la importación de mapas, creación de sitios y configuración de sectores operando en la banda 2 de frecuencia. También se trabajará sobre la calibración del modelo de estimación de pérdidas SPM con el objetivo de tener predicciones más cercanas a la realidad.

4.2 Creación de un proyecto de red LTE

Atoll es un software de planificación y simulación de redes móviles, desarrollado por la empresa Forsk. Atoll presenta un entorno de planificación mediante ventanas segmentadas para puntos específicos del proceso de creación de una red. Es una herramienta ingenieril para realizar estudios de redes inalámbricas sobre su rendimiento, provee herramientas flexibles en su manejo aumentando la productividad y reduciendo los tiempos de desarrollo [27].

Para crear un proyecto Atoll provee plantillas para las diferentes tecnologías móviles. Para utilizar la plantilla de LTE debemos ubicar la opción de File, una vez damos clic a esta opción observaremos la plantilla de LTE la cual debemos seleccionar [27].

En esta plantilla se tienen los tab de Geo, Network, Parameters y Sites, los cuales serán utilizados para la creación de todo el proyecto. Una vez se tiene creada la plantilla es necesario configurar las coordenadas geográficas correspondientes a la zona donde se trabajará. Para el caso de Nicaragua se utilizan las coordenadas WGS 84 UTM-16 Zone [27]. Para seleccionar las coordenadas se deben seguir los pasos siguientes clic en Documents --> Properties.

Realizado esto se procede a cargar los mapas correspondientes para Nicaragua. En estos se incluyen Altitud, Vectores y Clutter classes. Los mapas se cargan desde el tab de Geo. Es importante la correcta instalación de los mapas ya que Atoll tomará en cuenta las elevaciones del terreno, edificio y vectores al realizar predicciones de

niveles de señal. Es importante mencionar que se utilizan mapas con una resolución de 30 metros, misma que será utilizada en futuras predicciones. Una vez se cargan los mapas podremos observar un resultado como se muestra en la siguiente figura.

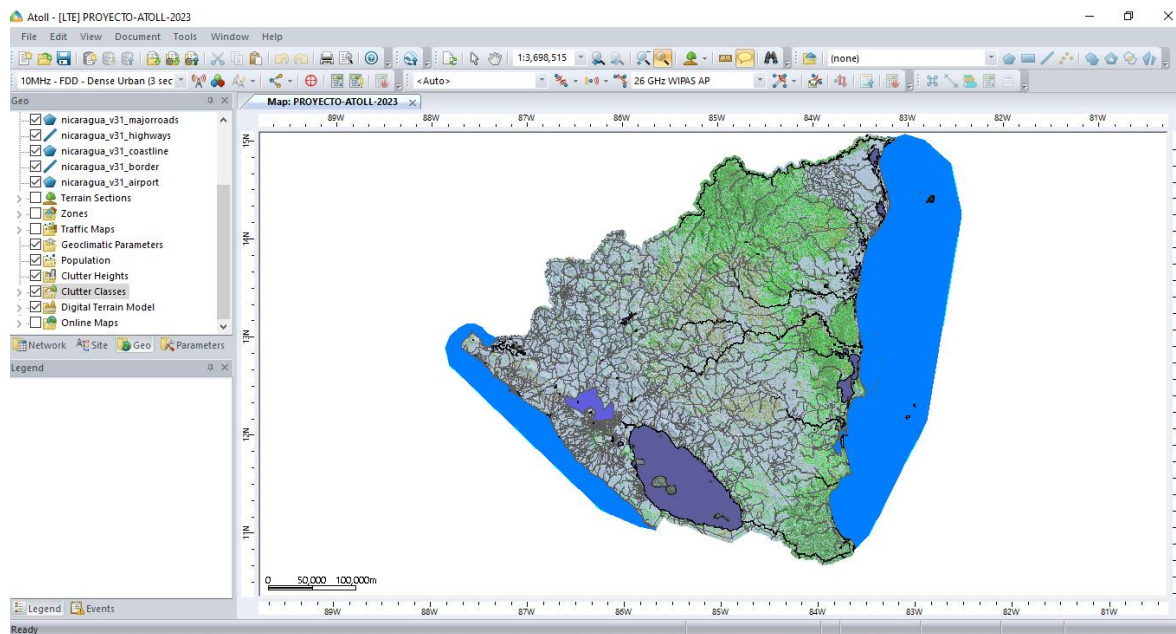


Figura 15. Mapas importados en Atoll. Elaboración propia.

4.3 Configuración de red LTE

Una vez se cargan los mapas correctamente se procede con las configuraciones de la red LTE, esto incluye los siguientes parámetros [28]: Importación de patrones de radiación de antena, creación de archivo de sitios con su ubicación geográfica, creación de tabla de transmisores (sectores) con sus azimuts correspondientes, creación de tabla de Cells con información detallada de los sectores, entre otros. En las siguientes tablas se visualizan las configuraciones realizadas para este proyecto las cuales incluyen los parámetros de los tab de Network y Parameters.

En la tabla 6 se muestran los sitios importados en Atoll. Es importante mencionar que esta tabla no muestra toda la información que requiere Atoll. Este define tablas muy precisas en su información para la correcta simulación de una red. Por otro lado, se observa que en la tabla 7 de transmitters se utiliza el modelo SPM que ya trae Atoll configurado, es decir, hasta este punto no se ha realizado ninguna

calibración de modelo SPM, por lo tanto, todos los transmisores tienen el SPM que viene por defecto en Atoll.

Tabla 6. Sitios importados en Atoll. Elaboración propia.

Name	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Max S1 interface throughput (DL) (kbps)	Max S1 interface throughput (UL) (kbps)
MN01	86°15'46.4"W	12°7'15.6"N	[140]	950000	950000
MN02	86°16'22.69"W	12°7'27.3"N	[132]	950000	950000
MN03	86°16'29.3"W	12°8'0"N	[108]	950000	950000
MN04	86°15'29.1"W	12°8'30.6"N	[77]	950000	950000
MN05	86°15'27"W	12°7'40"N	[120]	950000	950000
MN06	86°16'30.6"W	12°7'0.5"N	[167]	950000	950000
MN07	86°16'0.4"W	12°8'29.6"N	[79]	950000	950000
MN08	86°16'5.4"W	12°7'29.8"N	[132]	950000	950000
MN09	86°15'16.2"W	12°7'19.6"N	[139]	950000	950000
MN10	86°15'49.1"W	12°7'50.5"N	[113]	950000	950000
MN11	86°15'22.54"W	12°8'2.58"N	[100]	950000	950000
MN12	86°16'26.3"W	12°7'23.9"N	[135]	950000	950000
MN13	86°15'30.8"W	12°7'3.8"N	[160]	950000	950000
MN14	86°16'48.3"W	12°7'52.3"N	[118]	950000	950000
MN15	86°16'22.05"W	12°7'41.56"N	[118]	950000	950000
MN16	86°16'11.27"W	12°7'54.38"N	[108]	950000	950000

En la tabla de sites se muestran las ubicaciones geográficas de los sitios. Una vez se importan las ubicaciones en Atoll, el software utiliza los mapas cargados para determinar las elevaciones del terreno.

En la tabla de transmitters, se toma en cuenta la información actual de los sectores en la red, como: tipo de antena, altura de la antena, orientación mecánica de antena, pérdidas por transmisión y recepción. Atoll requiere información de pérdidas por feeders, aunque en la tabla no se observa, este valor se toma como 0, ya que en los sitios se está utilizando fibra óptica, con la cual las pérdidas serían imperceptibles con la corta distancia entre la antena y los equipos de radio.

Tabla 7. *Parámetros de Transmitters en Atoll. Elaboración propia.*

Site	Transmitter	Power (dbm)	Antenna	Altura	Azimuth	Tilt mecánico	Propagation Model
MN01	MN01A	50	Ericsson	42	50	3	SPM
MN01	MN01B	50	Ericsson	42	190	2	SPM
MN01	MN01C	50	Ericsson	42	280	3	SPM
MN02	MN02A	50	Ericsson	25	60	3	SPM
MN02	MN02B	50	Ericsson	25	160	2	SPM
MN02	MN02C	50	Ericsson	25	300	3	SPM
MN03	MN03A	50	Ericsson	42	40	3	SPM
MN03	MN03B	50	Ericsson	42	180	4	SPM
MN03	MN03C	50	Ericsson	42	310	2	SPM
MN04	MN04A	50	Ericsson	36	55	1	SPM
MN04	MN04B	50	Ericsson	36	160	1	SPM
MN04	MN04C	50	Ericsson	36	280	1	SPM

4.4 Elección de banda de frecuencia

La banda de frecuencia para ser trabajada es la banda 2 debido a que ha sido la más utilizada en los despliegues de red LTE en zonas con alta densidad de tráfico en la zona de estudio. Las configuraciones realizadas en Atoll tomará en cuenta esta banda de operación con ancho de espectro de 15 MHz.

Tabla 8. Elección de frecuencia de operación. Elaboración propia.

Banda de frecuencia	Enlace de operación Uplink. BS recibe UE transmite	Enlace de operación Downlink (DL) BS transmite UE recibe	Modo Duplex
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD

4.5 Calibración del modelo de estimación de pérdidas SPM

La calibración para el modelo de propagación estándar en Atoll se basa en la importación de datos en el módulo CW Measurement. La calibración es el proceso de limitar la diferencia entre los valores predichos y medidos. El objetivo de esta herramienta es calibrar los parámetros de la fórmula del modelo SPM [19]. El proceso de calibración se describe en la referencia Forsk donde proveen un capítulo donde se aborda únicamente sobre este proceso [29].

4.5.1 Descripción de la calibración para el modelo SPM

Para el proceso de calibración del modelo se realizó el filtrado de datos para cada uno de los sectores. Ya que cada sitio cuenta con 3 sectores se crearon 42 archivos con extensión .csv. Cada archivo cuenta con la información de RSRP y PCI correspondiente a cada sector. Para este proceso se utilizó la herramienta de CW Measurement proporcionada por el software Atoll. Para importar el drive test en el módulo CW Measurement se dispone de dos maneras de hacerlo [29]:

- Método 1: Con esta manera, es necesario tener archivos separados por medición de cada sector de cada sitio en el que se realizó un drive test, importando el archivo de medición seleccionando la variable de RSRP como referencia de medición.
- Método 2: De esta manera solo debe disponer de la medición de cada sector, puede ser en un mismo archivo, ya que necesita los valores de latitud, longitud y el valor de medición de referencia. Este método se conoce como “copiar y pegar”, ya que es el proceso que se realiza con la tabla generada por el módulo.

En caso se utilizó la primera opción. En la herramienta CW Measurement se crean carpetas cuya información corresponde a las mediciones de un sector en específico, es decir, se crea una carpeta por cada uno de los sectores para toda la red. El módulo CW toma tres parámetros los cuales son X, Y y M. Donde X y Y hacen referencia a las coordenadas de las muestras y el parámetro M, al valor de RSRP. En la siguiente figura se muestra lo antes explicado.

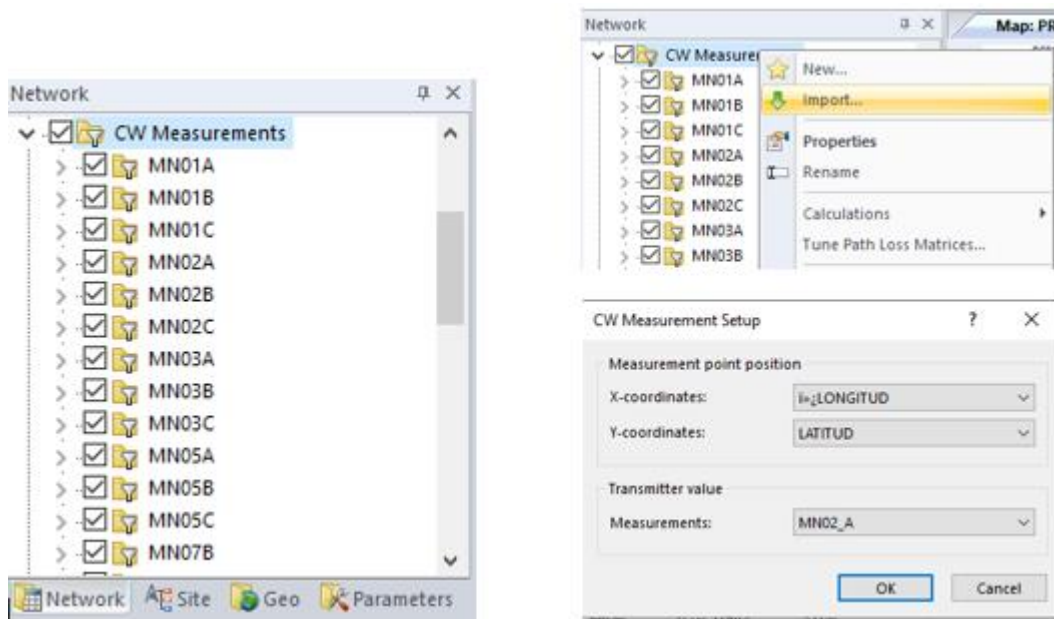


Figura 16. Importación de mediciones de Drive test. Elaboración propia.

Para la calibración del modelo SPM se siguió el manual de usuario de Forsk. Cuando se han importado los archivos se realizó la predicción del CW Measurement

donde se genera una variable P, esta variable es el resultado que provee la herramienta considerando los pixeles de la predicción de nivel de señal en mapa. Atoll realiza una diferencia entre el pixel generado por su predicción y el pixel de la muestra RSRP del drive test importado en el módulo CW. Es importante mencionar que este proceso utiliza cálculos más complejos para generar el resultado final, para tener más detalles de este procedimiento se recomienda leer la referencia sobre el manual de usuario proporcionado por Forsk [29].

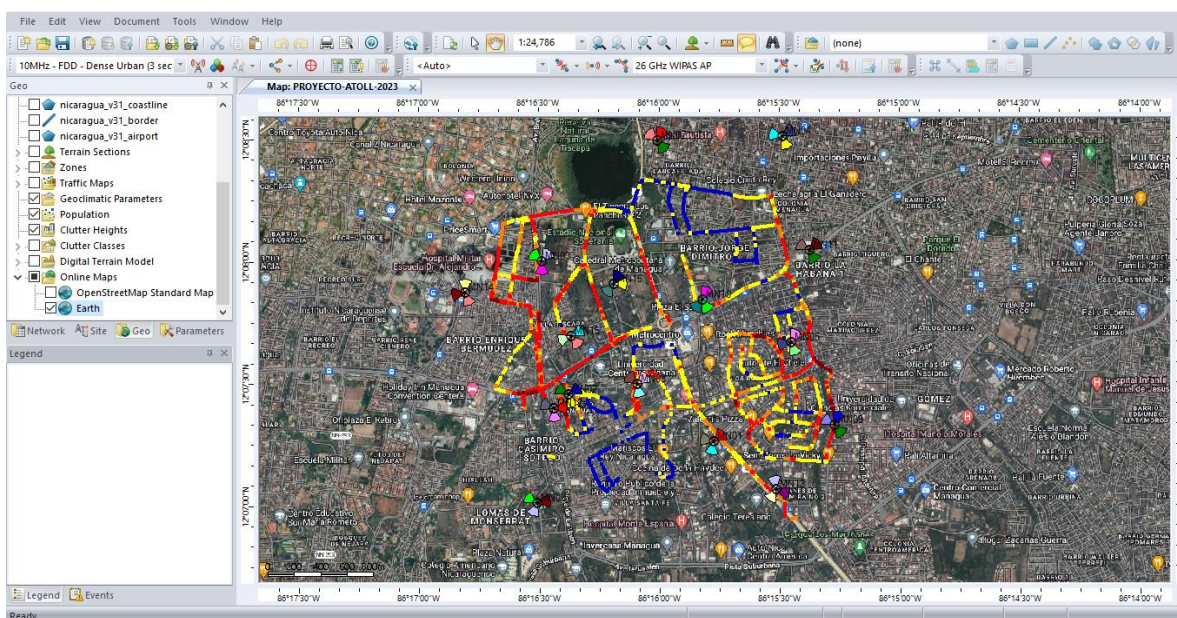


Figura 17. Importación de Drive Test en el módulo CW. Elaboración propia.

En la figura 17 se muestra el drive test importado en el módulo. Para este proyecto se realizaron múltiples pruebas de calibración hasta encontrar la más cercana a las muestras obtenidas en el drive test. La calibración del SPM es muy importante para una futura optimización de red. Teniendo el modelo calibrado se podrá observar los niveles de interferencia con una simulación de tráfico a través del parámetro $C/(i+N)$.

4.6 Estudios realizados en Atoll

Una vez realizada la calibración del modelo de estimación de pérdidas se procede a realizar predicciones de niveles de señal, overlapping, throughput entre otros. Para tener una guía de las predicciones que serán consideradas en este proyecto se realizaron las siguientes tablas que define los estudios dependientes como independientes del tráfico.

Tabla 9. Estudios independientes de la carga de tráfico. Elaboración propia.

ID	Tipo de Estudio	Servidor	Shadowing	Display
1	Coverage by Signal Level	ALL	95%	Best Signal Level (dBm)
2	Coverage by Transmitter	Best Signal		Coverage by Transmitters (DL)
3	Overlapping zones			Overlapping Zones (DL)
4	Effective Signal Analysis			Delta Path Loss (dB)

Tabla 10. Estudios dependientes de la carga de tráfico. Elaboración propia.

ID	Tipo de Estudio	Condiciones			Display
		Terminal	Mobility	Service	
5	Coverage by C/(I+N) Level (DL)	MIMO	Based on Scenario	High Speed Internet	PDSCH C/(I+N) Level (DL)
6	Coverage by Throughput (DL)				Peak RLC Channel Throughput (DL) (kbps)
7	Coverage by Quality Indicator				BLER
8	Service Area Analysis				Bearer (DL)

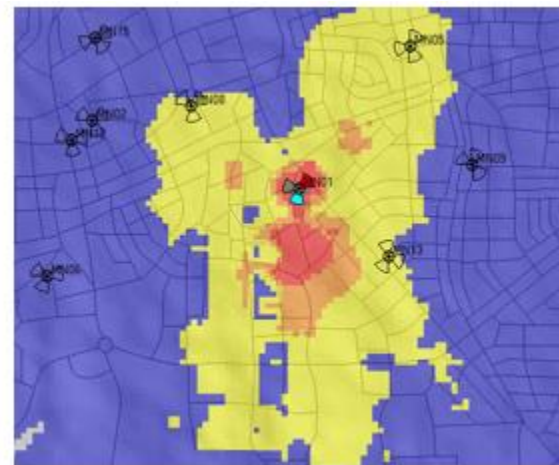
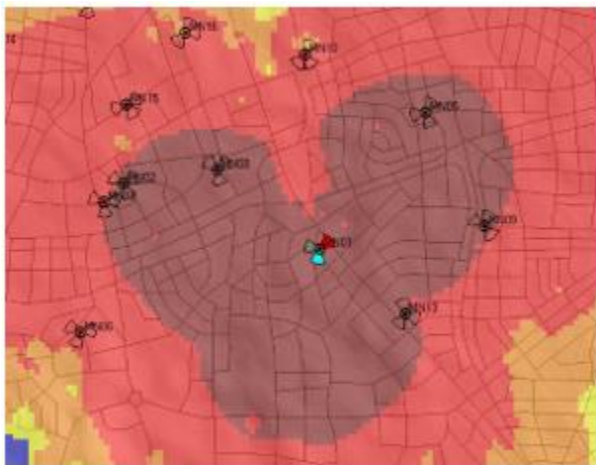
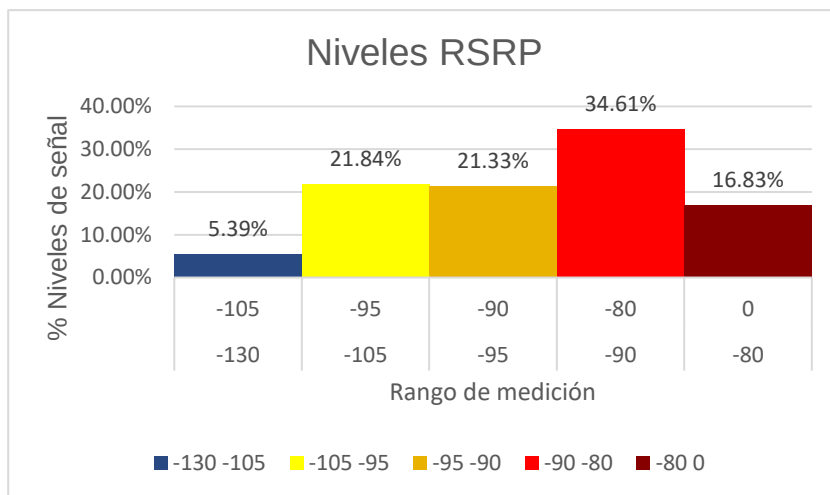
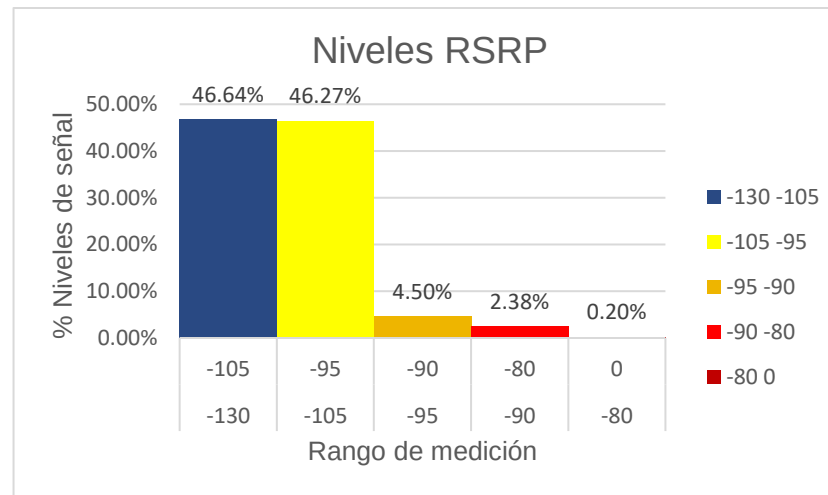


Figura 18. (a) Niveles RSRP sitio MN01 sin calibrar (b) Niveles RSRP sitio MN01 calibrado.



Histograma 8. Niveles de RSRP MN01 con SPM sin calibrar.



Histograma 9. Niveles de RSRP MN01 con SPM calibrado.

En la figura 18 (a) se muestra la predicción de intensidad de señal del sitio MN01 con SPM default utilizando el estudio número 1. Con la ayuda de un histograma podemos observar que un 72.77% de sus mediciones tienen un rango de -80 dBm a -95 dBm, es decir, la predicción muestra buenos niveles de señal en el área calculada de propagación de señal. Para tener valores de medición más cercanos a la realidad se configuró este mismo sitio con el SPM previamente calibrado. En la figura 18 (b) se muestra la predicción del sitio al realizar este cambio. En su histograma se observa que un 7.08% de sus mediciones se encuentra en el rango de -80 dBm a -95 dBm, teniendo gran diferencia a la predicción con SPM default. Los valores de medición obtenidos en la última predicción se asemejan más a los valores de Drive test para este sitio.

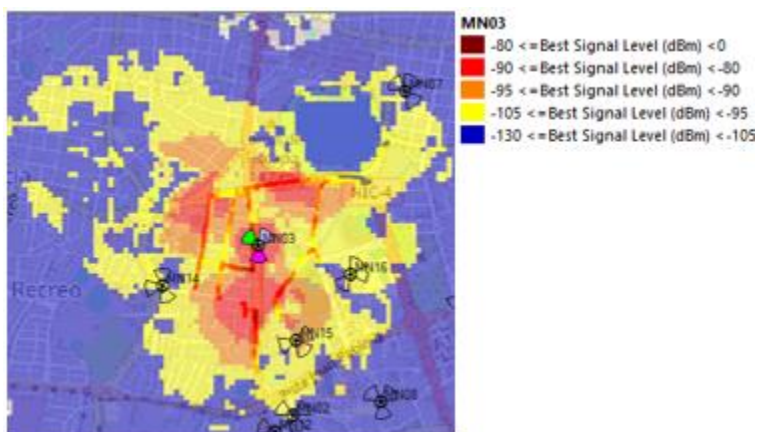


Figura 19. Predicción de nivel de señal sitio MN03 con Drive test. Elaboración propia.

En la figura 19 se observa la predicción de intensidad de señal del sitio MN03. Se puede observar los píxeles del drive test importado en el módulo CW Measurement y niveles de señal de la predicción. De esta manera se realiza una comparación entre las muestras de drive test y la predicción de Atoll con SPM calibrado.

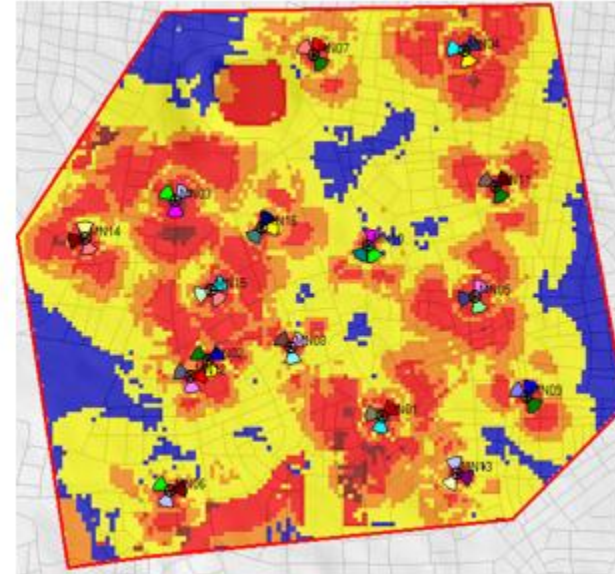
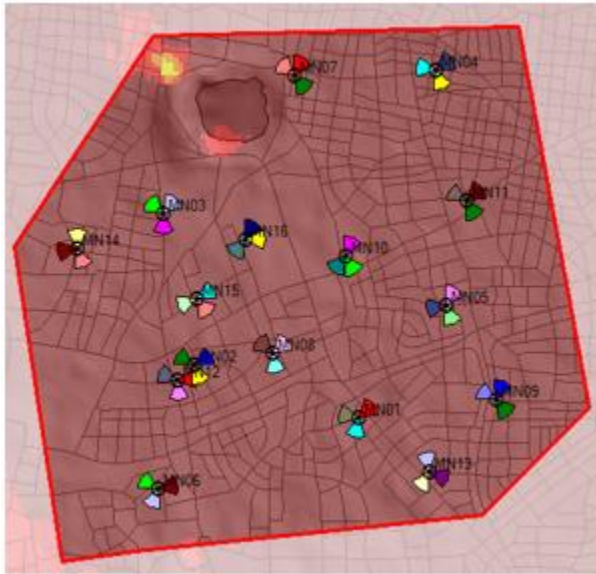
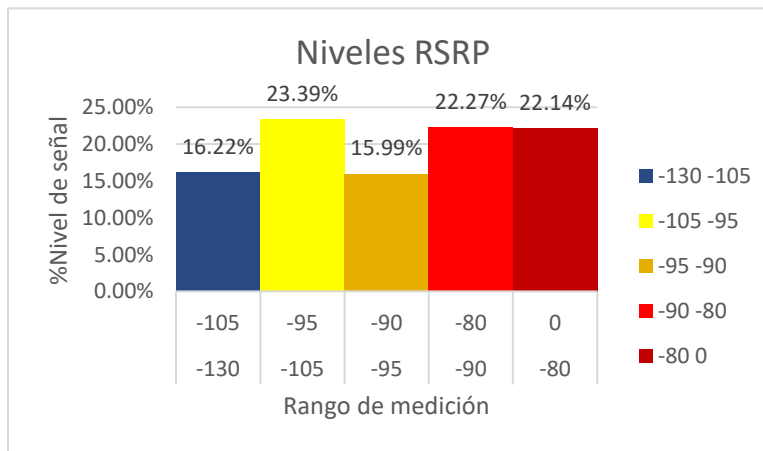
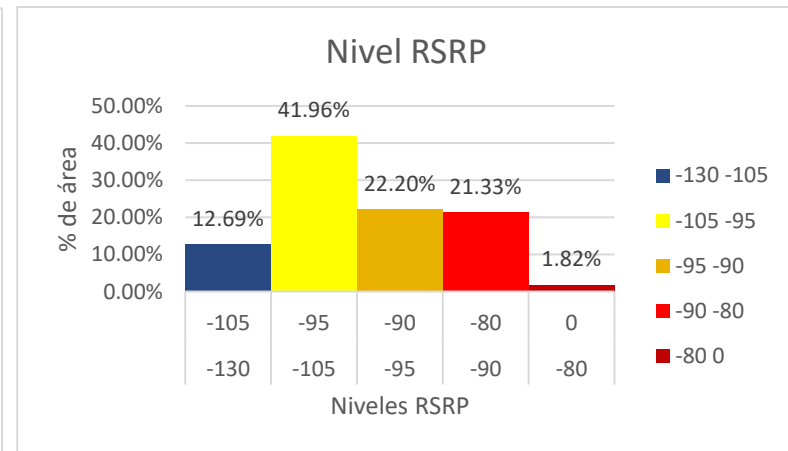


Figura 20. (a) Niveles RSRP de toda la red con SPM default. (b) Niveles RSRP de toda la red con SPM calibrado.



Histograma 10. Niveles RSRP de toda la red con SPM default.



Histograma 11. Niveles RSRP de toda la red con SPM calibrado.

Se realizaron pruebas de predicción de señal teniendo activos todos los transmisores de la red. En la figura 20 podemos observar el antes y después de utilizar SPM default y SPM calibrado. En la predicción de toda la red con SPM default se obtiene un 22.14% de valores de medición menores a -80 dBm mientras que utilizando el SPM calibrado en todos los transmisores se obtiene un 1.82% de valores de medición menores a -80 dBm. Teniendo predicciones más próximas a la realidad la optimización de la red será más eficiente.

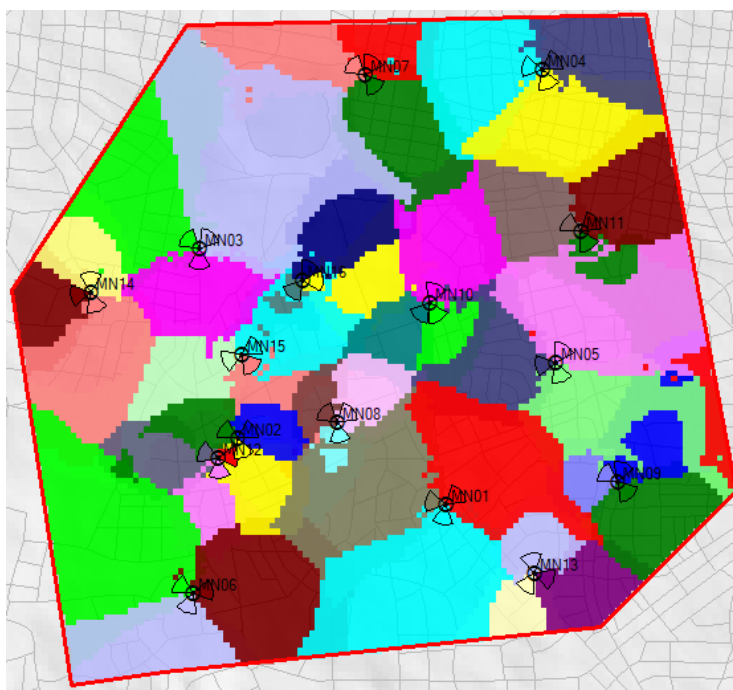


Figura 21. Cobertura por transmisores. Elaboración propia.

En la figura 21 se muestra el área de cobertura por cada transmisor dentro del compute zone definido en Atoll. Esta predicción hace referencia al estudio 2 Coverage by Transmitter (DL). Esta predicción podrá ser comparada en las predicciones de ajustes físicos de antena como parte de estrategia de mitigación de interferencia y optimización de red.

En la figura 22 se muestra la predicción Overlapping zones (DL). Para este caso se obtuvo que el porcentaje de las zonas en las que obtienen cobertura de un único transmisor es igual a 65.44%, zonas con hasta 2 celdas 26.58%, zonas con hasta 3 celdas 6.28% y por último zonas con hasta 4 servidores 1.7%.

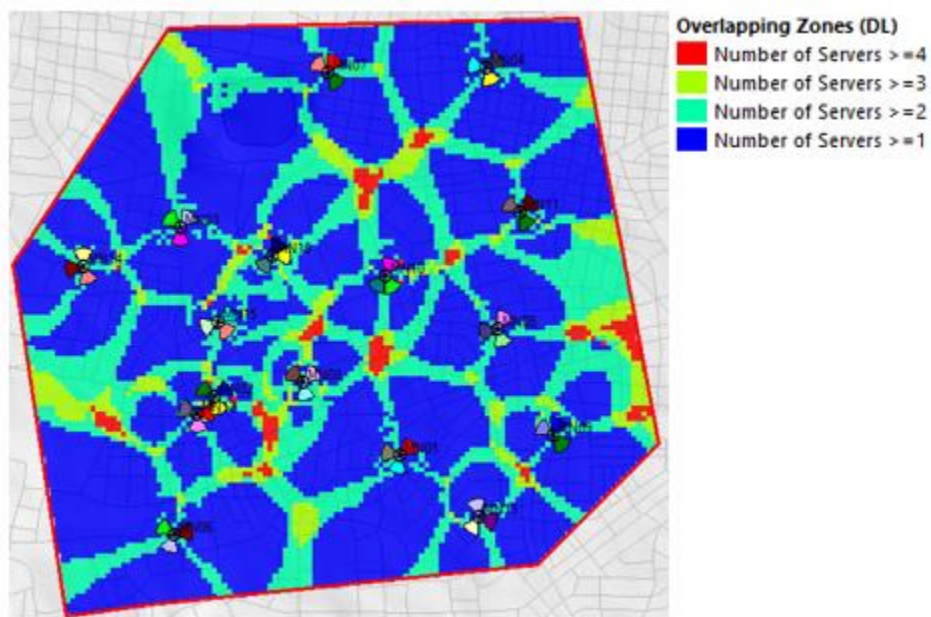


Figura 22. Estudio por Overlapping zones. Elaboración propia.

4.7 Creación de escenarios de red LTE

En esta sección se abordará el proceso de creación de escenarios de red a través de simulaciones Monte Carlo y la implementación de las estrategias de mitigación de interferencia Tilt eléctrico/mecánico, ICIC y SU-MIMO en escenarios dados. El objetivo de estas actividades es obtener los resultados del comportamiento de la red por cada escenario y observar que estrategia es más apropiada según el escenario de red.

Los escenarios son creados con el propósito de observar cómo las estrategias reaccionan a los cambios que pueda tener la red. Se realizarán estudios dependientes del tráfico como throughput y $C/(i+N)$ de tal manera que se obtenga una antes y después de aplicar las estrategias de mitigación de interferencias.

Para los escenarios se realizan configuraciones de desde el tab de Parameters en Atoll. Desde este punto se configuran los parámetros necesarios que Atoll tomará en cuenta para simulaciones de red con carga de tráfico tomando en cuenta el tipo de zona (rural, urbana, semi urbana etc.), a través de simulaciones de Monte Carlo.

En la siguiente sección se detalla el proceso para llegar a la simulación de tráfico en la red que a su vez permite predicciones dependientes del tráfico como la calidad de señal.

4.7.1 Mapa de tráfico

Para poder realizar predicciones de calidad de la señal, las cuales son dependientes de tráfico, la herramienta Atoll ofrece la posibilidad de representar la carga que presenta la red a través de dos formas, la primera es utilizando valores definidos en la tabla de celdas y la segunda a través de simulaciones de Monte Carlo [30].

A partir de datos de tráfico, que se obtienen de los mapas de tráfico o de la lista de suscriptores que estén definidos en el proyecto, Atoll genera una distribución de usuarios utilizando el algoritmo de Monte Carlo y pondera dicha distribución a través de una distribución de Poisson [30].

4.7.2 Configuración de servicios

En el apartado de configuración de servicios se realizan las configuraciones por cada servicio que considera Atoll. En estas configuraciones se detallan características como mayor y menor bearer, máximo y mínimo throughput demandado, entre otros. En la tabla 11 se detallan los parámetros por defecto que toma Atoll para la tecnología LTE.

Tabla 11. Configuración de servicios. Elaboración propia.

Description	High Speed Internet	Mobile Internet Access	Video conferencing	VoIP
Highest bearer	15	15	15	15
Lowest bearer	4	4	4	4
Max throughput demand (DL)(kbps)	4096	4096	64	12.2
Max throughput demand (UL)(kbps)	1024	64	64	12.2
Min throughput demand (DL)(kbps)	128	64	64	12.2
Min throughput demand (UL)(kbps)	128	32	64	12.2
Body Loss (dB)	0	0	0	3

Como se puede observar el único servicio con Body Loss (dB) es VoIP con 3 dB. Este nivel de pérdida es un valor estándar establecido según diversos estudios. Al establecer el uso del este servicio se considera la pérdida del cuerpo humano de 3 dB.

Para la configuración de servicios Atoll toma por defecto que el bearer más alto es 15 correspondiente a la modulación de 64QAM, es decir que es los escenarios de simulación se considera que un dispositivo móvil puede llegar a alcanzar la mayor velocidad en una zona en específico.

4.7.3 Configuración de Radio Bearer

En la figura 23 se observa la configuración de radio bearer en Atoll. Es importante mencionar que durante la simulación se pueden encontrar usuarios con un bearer específico para el servicio seleccionado por el usuario. Cada servicio tiene una asignación mínima y máxima como se mencionó en el apartado anterior. Un bearer de 15 equivale a una modulación 64QAM 11/12 como se muestra en la figura.

Radio Bearer Index	Name	Modulation	Channel Coding Rate	Bearer Efficiency (bits/symbol)
1	QPSK 1/12	QPSK	0.0761719	0.1523
2	QPSK 1/9	QPSK	0.117188	0.2344
3	QPSK 1/6	QPSK	0.188477	0.377
4	QPSK 1/3	QPSK	0.300781	0.6016
5	QPSK 1/2	QPSK	0.438477	0.877
6	QPSK 3/5	QPSK	0.587891	1.1758
7	16QAM 1/3	16QAM	0.369141	1.4766
8	16QAM 1/2	16QAM	0.478516	1.9141
9	16QAM 3/5	16QAM	0.601563	2.4063
10	64QAM 1/2	64QAM	0.455078	2.7305
11	64QAM 1/2	64QAM	0.553711	3.3223
12	64QAM 3/5	64QAM	0.650391	3.9023
13	64QAM 3/4	64QAM	0.753906	4.5234
14	64QAM 5/6	64QAM	0.852539	5.1152
15	64QAM 11/12	64QAM	0.925781	5.5547

Figura 23. Configuración de técnicas de modulación empleadas en Atoll. Elaboración propia.

4.7.4 Configuración de movilidad de usuarios

Atoll tiene diferentes configuraciones de movilidad de usuarios que pueden ser utilizadas para las simulaciones de tráfico. Atoll establece una movilidad respecto a la velocidad de desplazamiento de usuario. Para los dos escenarios de red se tomarán 3 tipos de movilidad para esta configuración los cuales son usuarios desplazándose a 50 Km/h, Pedestrian 3 Km/h y Fixed 0 Km/h como se detalla en la siguiente figura.

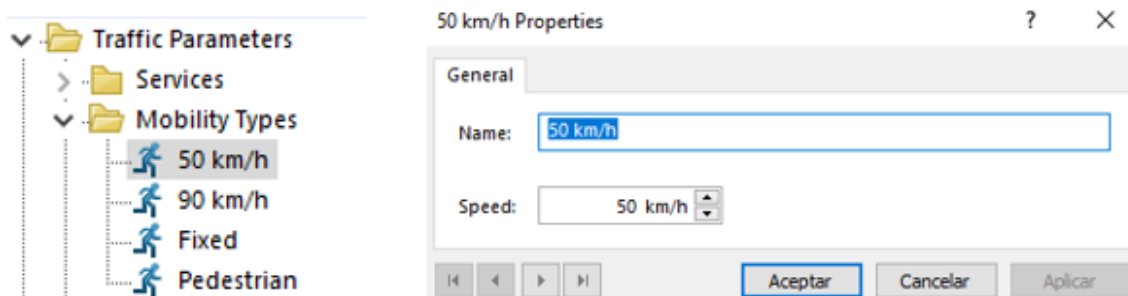


Figura 24. Configuración de movilidad de usuarios. Elaboración propia.

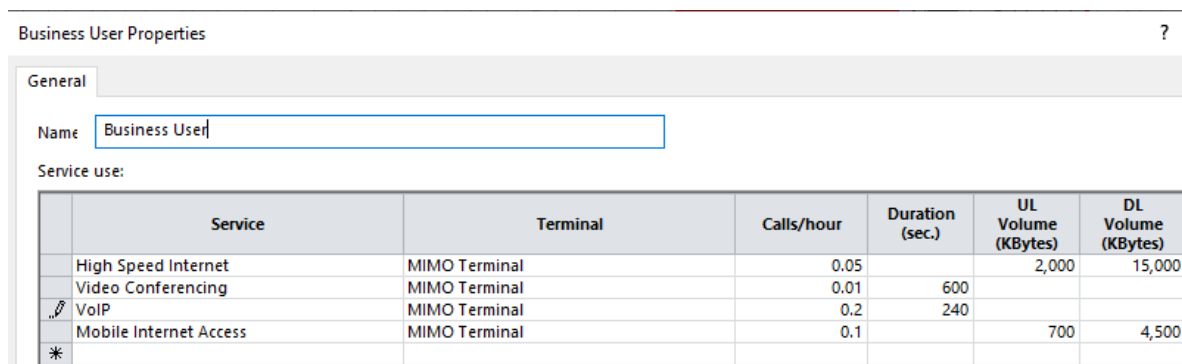
4.7.5 Configuración de terminal

En este paso se realiza la configuración del equipo terminal de usuario considerado en la simulación. Para este proyecto se trabaja con un equipo con capacidades MIMO y de categoría 5 con una potencia máxima de 23 dBm y mínima de -43 dBm. También se utiliza una figura de ruido (Noise Figure) de 8 dB.

En LTE el factor de ruido es la relación entre la SINR en el extremo de entrada y la SINR en el extremo de salida del receptor. La unidad es dB. El factor de ruido es un índice importante utilizado para medir el rendimiento de un receptor. El factor de ruido depende en gran medida del ancho de banda operativo. El Noise Figure de un terminal LTE común suele ser de 6 dB a 8 dB y el valor típico utilizado es de 7 dB [31].

4.7.6 Configuración de perfiles de usuario

En la configuración de perfiles de usuario Atoll crea una tabla combinando los tipos de servicios y terminales. Atoll establece en su tabla parámetros como Call/hours, Duration, UL Volume (KBytes) y DL Volume (KBytes). Se puede observar en la figura 25 que Atoll toma en consideración para cada servicio el tipo de terminal móvil de usuario. Para el caso de los servicios High Speed Internet y Mobile Internet Access se detallan limitaciones en la descarga y carga de datos en los enlaces correspondientes. Para el caso de UL se establece 2,000 KBytes para el servicio High Speed Internet y 700 KBytes para el servicio de Mobile Internet Access. De la misma manera Atoll establece una máxima descarga de datos de 15,000 KBytes y 4,500 en los servicios correspondientes.



Service	Terminal	Calls/hour	Duration (sec.)	UL Volume (KBytes)	DL Volume (KBytes)
High Speed Internet	MIMO Terminal	0.05		2,000	15,000
Video Conferencing	MIMO Terminal	0.01	600		
VoIP	MIMO Terminal	0.2	240		
Mobile Internet Access	MIMO Terminal	0.1		700	4,500

Figura 25. Configuración de perfil de usuario. Elaboración propia.

4.7.7 Configuración de tipo de entorno

Como última configuración dentro de los parámetros de tráfico de la red LTE, Atoll provee tipos de entornos que pueden ser utilizados según la zona de estudio. Por defecto Atoll provee entornos para zonas densamente urbana, rurales, suburbanas y urbanas. Según sea la densidad Atoll toma en consideración una distribución de usuarios por km².

Desde este punto podemos definir los escenarios que tomaremos en el proyecto. Se realizarán simulaciones para 2 tipos de escenarios en dependencia del número de usuarios. Para los escenarios se tomará en cuenta las movilidades de 50 Km/h para usuarios que se desplazan en vehículos, la movilidad Pedestrian para peatones desplazándose a una velocidad de 3 Km/h y la movilidad Fixed definida por Atoll para los usuarios estáticos. También se realizará una distribución de 100 usuarios para las movilidades de 50 Km/h, 250 usuarios para la movilidad Fixed y 350 usuarios para la movilidad Pedestrian.

User Profile	Mobility	Density (Subscribers/km ²)
Business User	50 km/h	100
Business User	Fixed	250
Business User	Pedestrian	350

Figura 26. Configuración de entorno densamente urbano primer escenario. Elaboración propia.

En la figura 26 se muestra el resultado como se representa en Atoll. Se tiene un total de 700 usuarios por Km² y un total de 7,690 en todo el mapa de tráfico creado para la red. La cantidad de usuarios mencionada representa el 100% para el mapa de tráfico, siendo este el primer escenario a realizar.

El segundo escenario de red se realizará con un 70% del total de usuarios en la red, lo cual corresponde a 490 usuarios por Km² y un total de 5,383 usuarios para toda la red dentro de la zona suburbana como se muestra en la siguiente figura.

General **Clutter Weighting**

Name:

User profiles:

	User Profile	Mobility	Density (Subscribers/km ²)
	Business User	50 km/h	70
	Business User	Fixed	175
	Business User	Pedestrian	245
*			

Figura 27. Configuración de entorno densamente urbano segundo escenario. Elaboración propia.

En la tabla 12 se observa un resumen de los escenarios que serán implementados para las simulaciones de tráfico. Las configuraciones de Bearer, perfiles de usuario, servicios y terminales es igual para ambos escenarios. Como fue mencionado anteriormente la variación de los escenarios se encuentra en la densidad de usuarios en la red a considerar dentro del mapa de zona.

Tabla 12. Descripción de escenarios de red. Elaboración propia

Descripción	Movilidad	Entorno	% Usuarios	Densidad de usuarios Km ²	Usuarios Totales
Escenario 1	50 km/h, Fixed, Pedestrian	Suburbano	100	700	7,690
Escenario 2	50 km/h, Fixed, Pedestrian	Suburbano	70	490	5,385

4.8 Packet Scheduling

Es importante mencionar que en las simulaciones se utiliza un Packet Scheduling Proportional Fair. Esta estrategia sí toma en cuenta las condiciones del canal (channel-aware) y su objetivo es conseguir un equilibrio entre ser una estrategia justa y optimizar el throughput de cada usuario, para ello el scheduler asigna recursos a un usuario cuando la calidad de canal que dicho usuario observa en un determinado momento (calidad instantánea) es mayor a la calidad media que el mismo usuario ha percibido en el tiempo [1].

4.9 Resultados de simulación Monte Carlo primer escenario

En la siguiente figura se muestra el resultado del mapa de tráfico con una densidad de 700 usuario por Km². Como se puede observar las muestras en color verde representa a usuarios conectados para los enlaces DL+UL, las muestras de color azul representa usuario únicamente en el servicio de DL, así mismo las muestras color amarillo representan usuario únicamente conectados en UL, obsérvese que las muestras color rojo describen usuarios fuera de la cobertura de la red o sin servicios y en su mayoría se encuentran en el borde del compute zone.

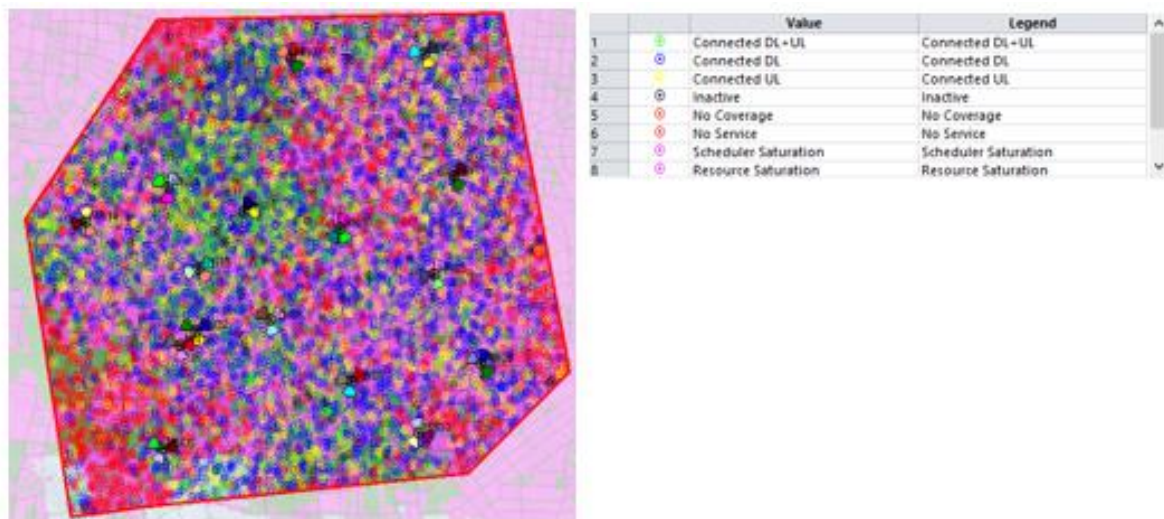


Figura 28. Resultado de simulación Monte Carlo. Elaboración propia.

Una vez se configura la cantidad de usuario por movilidad para el primer escenario, Atoll realiza primeramente una probabilidad de cuantos usuarios del total que hemos asignado en la configuración de entorno intentarán conectarse a la red como también la probabilidad de los usuarios conectados a los diferentes servicios. A partir de la probabilidad que Atoll toma realiza el proceso de distribución de usuarios como un resultado final donde considera que el 100% son los usuarios que están intentando conectarse a la red.

En la simulación del primer escenario el resultado de la probabilidad de usuarios que intentan conectarse a la red es de 381.73 usuarios Km². Para el servicio DL se obtienen 201.6 usuarios en UL 118.47 usuarios y para DL+UL 41.13 usuarios, adicionalmente en la simulación de obtuvieron 20.53 usuarios inactivos. Los resultados descritos anteriormente son generados por la simulación en relación a la demanda por los servicios de la red. A partir de estos resultados Atoll realiza nuevos cálculos.

A partir de los resultados de la probabilidad de Atoll se obtuvo el resultado de la simulación. En la simulación final se obtuvo un total de 297.67 usuarios conectados en la red, representando un 78% del total de usuarios que Atoll considera como usuarios intentando conectarse a la red (381.73 usuarios) como se mencionó anteriormente. Para el enlace DL se obtuvo 161.27 usuarios, enlace UL 92, para ambos enlaces DL+UL 29.47 usuarios, por último, se obtuvieron 14.93 usuarios inactivos. En el caso de usuarios fuera del área de cobertura se obtuvieron 43.33 y 47.2 usuarios sin servicio. La suma de estos usuarios es de 84.07 usuarios, la siguiente figura se muestra lo antes explicado.

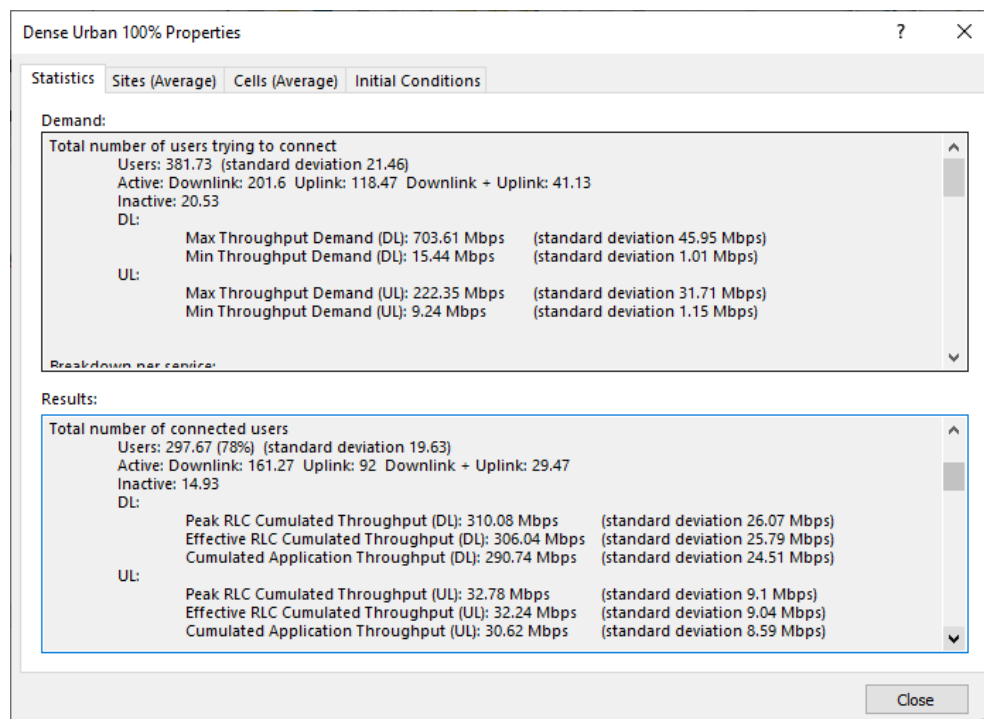


Figura 29. Ventana de estadísticas de simulación Monte Carlo. Elaboración propia

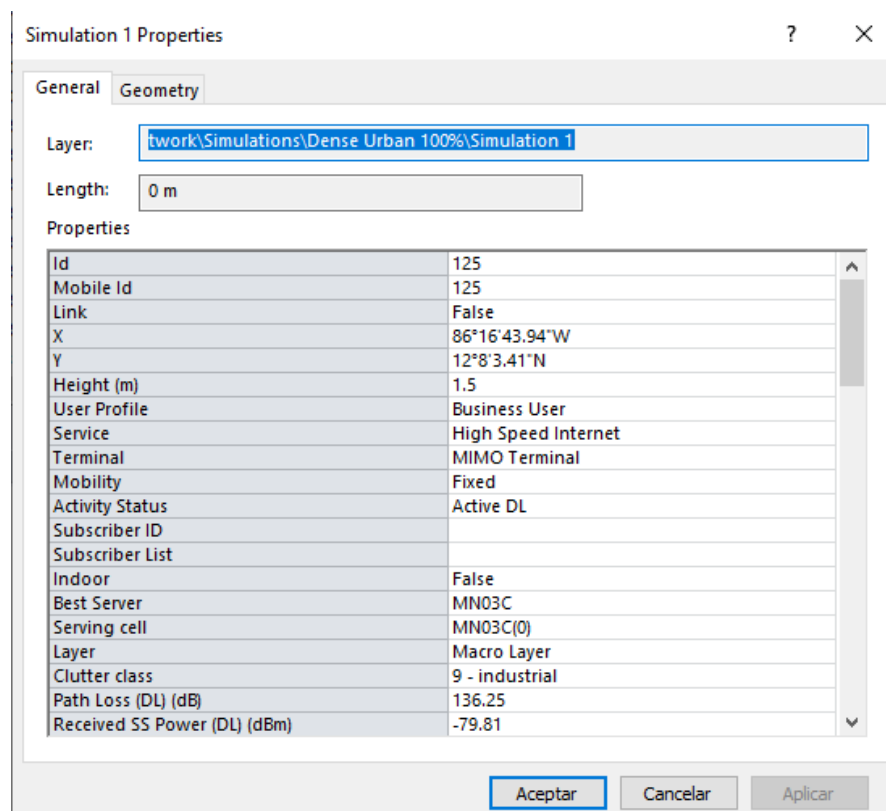


Figura 30. Resultado de simulación para un usuario en la red. Elaboración propia.

En la figura 30 se observa la información de un usuario que se encuentra dentro de la zona del mapa de tráfico. Como se observa en la tabla que genera Atoll, este usuario alcanza un Bearer (DL) de (64QAM 11/12) y una velocidad pico de 59,697 kbps.

En la tabla 13 se detalla el resultado general de toda la red por servicio. Por cada uno de los servicios se describe la cantidad de usuarios totales conectados, usuarios utilizando enlace DL, UL y DL+UL respectivamente y la velocidad máxima alcanzada en el servicio en enlace DL y UL.

En la tabla 14 se da más detalle esta vez obteniendo información por cada sitio. Se puede observar la velocidad máxima que alcanza el sitio en Kbps para el enlace de DL y UL, los usuarios conectados en UL, DL y DL+UL, usuarios inactivos y total de usuarios por sitio.

El termino Peak RLC Channel throughputs Atoll se determina por la multiplicación de los símbolos de una trama para ambos enlaces (DL, UL) y la eficiencia del bearer obtenido por un pixel del mapa.

El parámetro Effective RLC throughput es el rendimiento RLC máximo reducido por la retransmisión debida a errores, o la tasa de errores de bloque (BLER). Atoll utiliza los gráficos de tasa de error de bloque del equipo de recepción definido en el terminal seleccionado para el enlace descendente o el equipo de recepción de la célula del transmisor de servicio para el enlace ascendente.

El Application throughput es el rendimiento efectivo de la RLC reducido por el overhead de las diferentes capas entre la RLC y las capas de aplicación.

Atoll calcula el Cumulated Peak de RLC, Effective RLC y Application throughput durante las simulaciones Monte Carlo. El Cumulated throughput para una celda es la suma de throughput de todos usuarios de la celda.

4.9.1 Resultados de simulación por servicio y sitio

Tabla 13. Primer escenario de red. Resultado de simulación general y por servicio. Elaboración propia.

Servicio	Usuarios	DL	UL	DL+UL	Usuarios inactivos	Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)
Total	297.67	161.27	92	29.47	14.93	310.08	32.78
High Speed Internet	80.87	39.8	40.87	0.2	0	86.22	30.62
Mobile Internet Access	130.53	99.4	30.8	0.33	0	222.91	1.29
Video Conferencing	11.6	3.33	2.33	2.93	3	0.40107	0.33707
VoIP	74.67	18.73	18	26	11.93	0.54575	0.5368

Tabla 14. Primer escenario de red. Resultado de simulación por sitio. Elaboración propia.

Site	Peak RLC Cumulated Throughput (DL) (kbps)	Peak RLC Cumulated Throughput (UL) (kbps)	connected users (UL)	connected users (DL)	connected users (UL+DL)	Inactive Users	Total connected users
MN01	41159.9	4746.4	10.93	20.46	3.4	1.66	36.46
MN02	9860.86	666.57	2.26	4.6	0.53	0.53	7.93
MN03	45737.1	5447.51	11.46	19.73	4.06	1.66	36.93
MN04	32704.8	2731.1	6.93	14.13	2.6	1.2	24.86
MN05	24386.2	2968.36	8.66	14.13	2.73	1.26	26.8
MN06	30183.6	1947.55	8.53	16.86	3.33	1.4	30.13
MN07	11643.5	984.5	4.86	7	1.46	0.73	14.06
MN08	5740.88	964.48	2.8	3.6	0.6	0.33	7.33
MN09	12522.8	1072.58	3.66	6.4	0.86	0.66	11.6
MN10	9076.93	385.39	3	5.93	1.2	0.8	10.93
MN11	19552.6	1787.09	6.26	11.86	1.73	1.33	21.2
MN12	7101.02	682.47	2.2	3.66	0.86	0.4	7.13
MN13	9121.58	694.98	3.13	5.4	0.93	0.33	9.8
MN14	18424.7	2991.72	6.86	9.46	1.8	1.06	19.19
MN15	21537.9	2703.17	6.26	11.26	2.2	0.73	20.46
MN16	11325.2	2011.18	4.13	6.73	1.13	0.8	12.8

4.9.2 Predicción de Throughput

En la figura 31 se observan las muestras por pixeles que toma Atoll por el throughput alcanzado. Para esta predicción se obtuvo un 73.09% del área total en niveles Peak RLC Channel Throughput (DL)(kbps) mayor a 20,480 kbps. Los resultados se detallarán con más detalle.

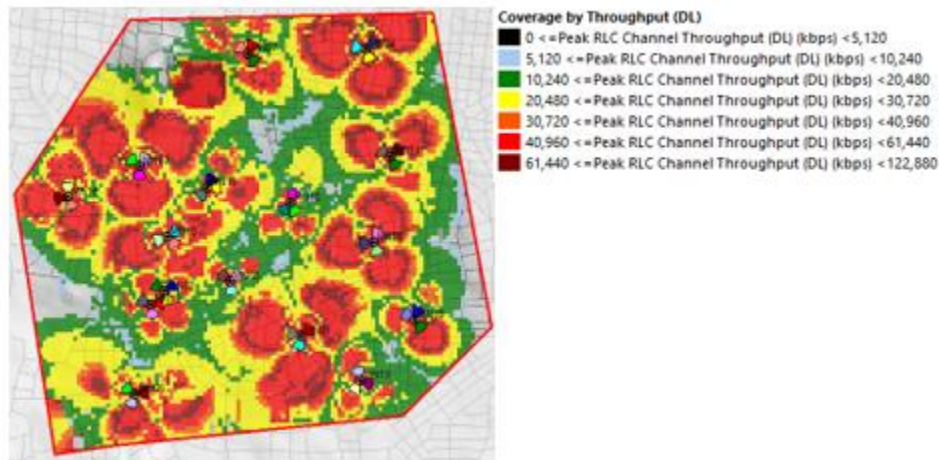
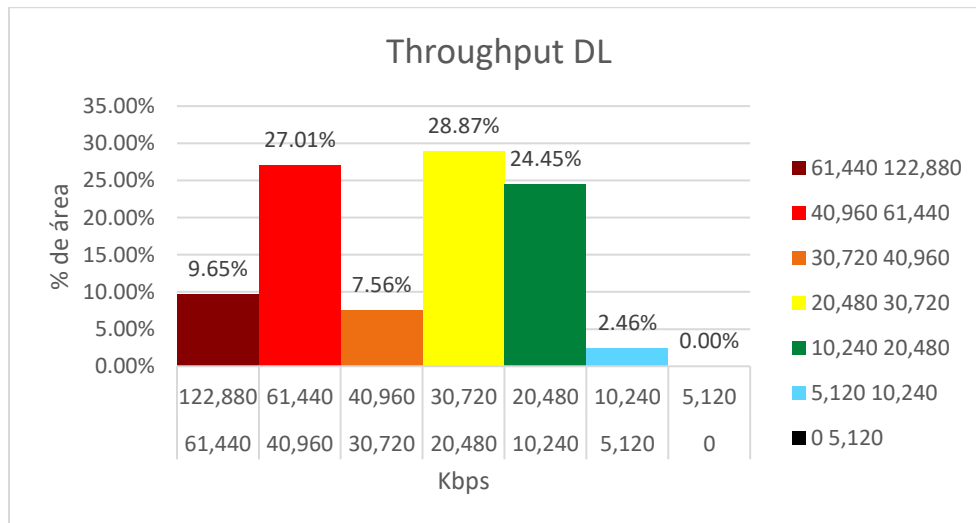


Figura 31. Predicción throughput para toda la red. Elaboración propia.

Para apreciar mejor los resultados se realizó un histograma que contiene la información por porcentaje de muestra según el total del área dentro del mapa de tráfico.



Histograma 12. Resultados de Throughput según el porcentaje de área. Elaboración propia.

4.9.3 Predicción de C/(i+N)

En la siguiente figura se muestra la predicción de C/(i+N) para todos los transmisores. La mayor parte de la cobertura de este parámetro se encuentra entre 4dB a 11dB, lo cual representa un 43.34% del total de área, mientras que para los valores entre 11dB a 18dB se obtuvo un porcentaje de 32.11%, todos aquellos valores mayores a 18 dB representan un 11.06% del área total.

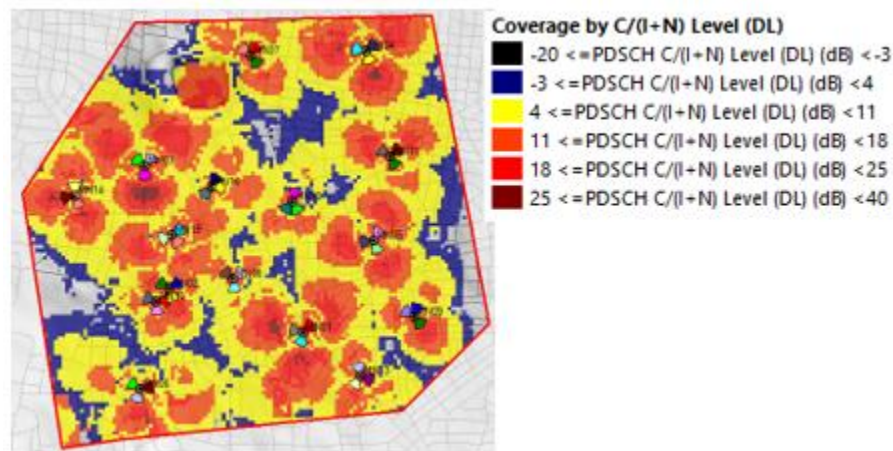
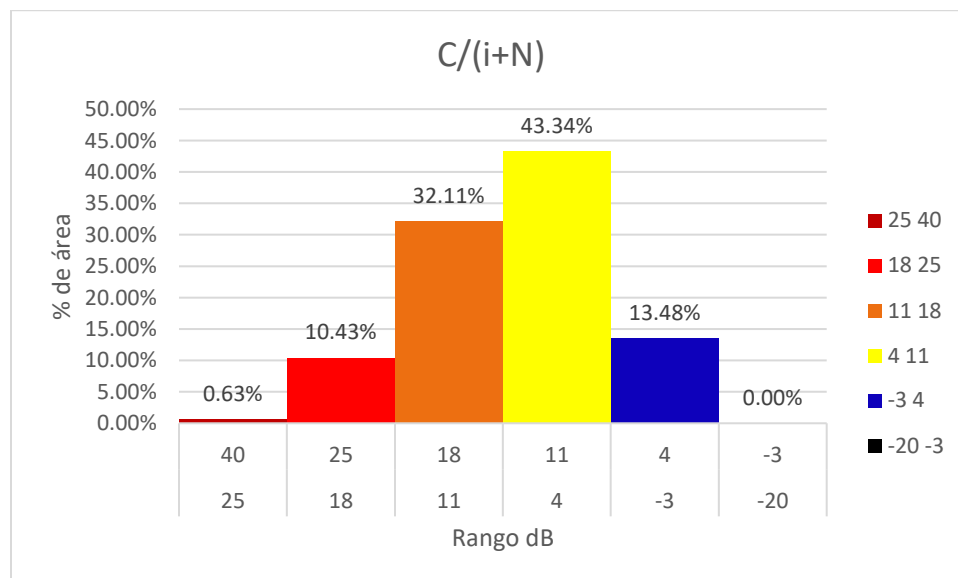


Figura 32. Predicción C/(i+N) para toda la red. Elaboración propia.

En el siguiente histograma se observa el porcentaje que se obtuvo por cada muestra según el total de área en estudio.



Histograma 13. Resultado de C/(i+N) para enlace DL. Elaboración propia.

4.10 Resultados de simulación Monte Carlo segundo escenario

Para el segundo escenario se obtuvo el siguiente resultado en la probabilidad de usuarios que intentará conectarse a la red. El total de usuarios que intentan conectarse son 274.2, para el servicio de DL 143.93 usuarios, para el servicio de UL 87.67, para los servicios DL+UL 29.27 usuarios, usuarios inactivos se obtuvo 13.33.

En la simulación final se obtuvo un total de 210.87 usuarios conectados en la red, representando un 76.9% del total de usuarios que Atoll considera como usuarios intentando conectarse a la red (274.2 usuarios) como se mencionó anteriormente. Para el enlace DL se obtuvo 115.13 usuarios, enlace UL 65.6, para ambos enlaces DL+UL 21.27 usuarios, por último, se obtuvieron 8.87 usuarios inactivos. En el caso de usuarios fuera del área de cobertura se obtuvieron 31.13 y 29.53 usuarios sin servicio. En la siguiente figura se muestra lo antes explicado.

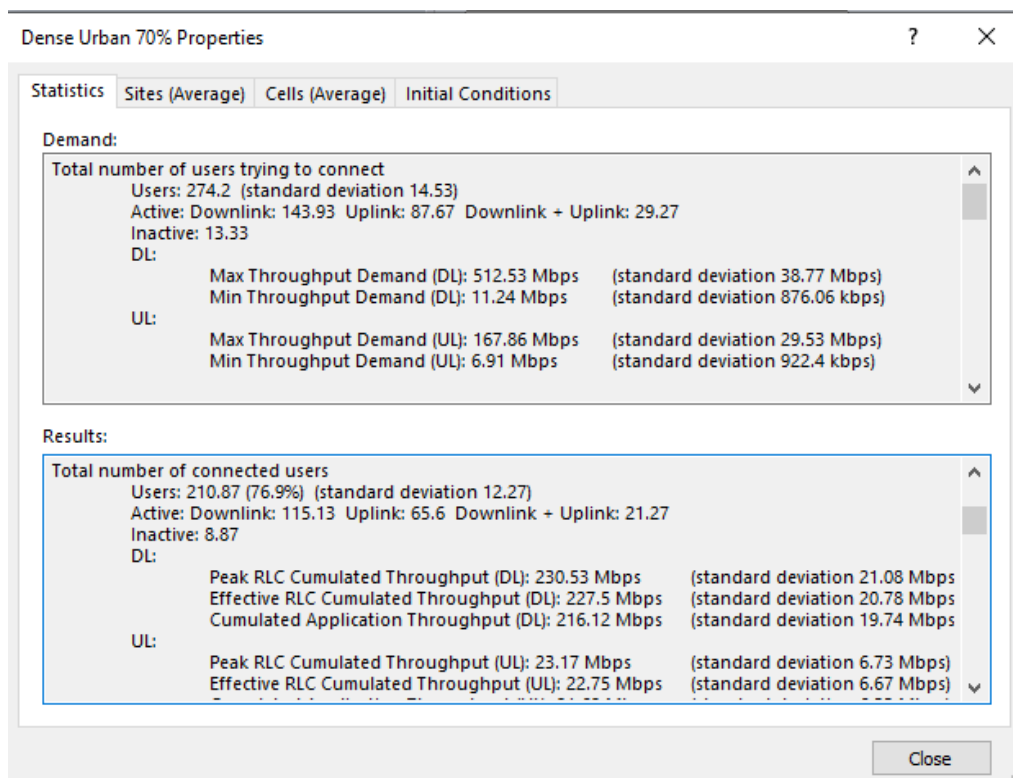


Figura 33. Ventana de estadísticas de simulación Monte Carlo. Elaboración propia.

4.10.1 Resultados de simulación por servicio y sitio

Tabla 15. Segundo escenario de red. Resultado de simulación general y por servicio. Elaboración propia.

Servicio	Usuarios	DL	UL	DL+UL	Usuarios inactivos	Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)
Total	210.87	115.13	65.6	21.27	8.87	230.53	23.17
High Speed Internet	59.73	30.47	29.13	0.13	0	69.67	21.65
Mobile Internet Access	92.6	70.07	22.13	0.4	0	160.26	0.88722
Video Conferencing	7.4	1.67	2.33	1.6	1.8	0.20907	0.25173
VoIP	51.13	12.93	12	19.13	7.07	0.39121	0.37983

Tabla 16. Segundo escenario de red. Resultado de simulación por sitio. Elaboración propia.

Site	Peak RLC Cumulated Throughput (DL) (kbps)	Peak RLC Cumulated Throughput (UL) (kbps)	connected users (UL)	connected users (DL)	connected users (UL+DL)	Inactive Users	Total connected users
MN01	33452	4038.76	8.53	15.86	2.4	1.2	28
MN02	7707.98	605.8	1.73	3.53	0.66	0.13	6.06
MN03	34963.5	4634.27	9.6	15.4	2.8	1.33	29.13
MN04	18360.4	1681.16	5.53	8.2	1.33	0.8	15.86
MN05	17847.2	2898.83	5.73	7.93	2.33	0.66	16.66
MN06	22150.9	2456.13	6.8	11	1.46	1.26	20.53
MN07	9508.48	817.34	2.2	6.13	0.93	0.26	9.53
MN08	4581.32	124.4	1.13	3.06	0.46	0.26	4.93
MN09	9567.24	789.84	3.53	5.2	0.66	0.26	9.66
MN10	7799.56	313.08	2.33	5.46	0.66	0.46	8.93
MN11	15360.8	1075	5.06	8.53	1.93	0.26	15.8
MN12	4303.29	364.11	1.4	2.26	0.4	0.2	4.26
MN13	7163.37	197.26	1.86	3.93	0.46	0.26	6.53
MN14	12952.1	905.18	3.2	5.53	1.4	0.66	10.8
MN15	14652.1	1623.24	4.06	7.2	2.06	0.66	14
MN16	10163.6	645.88	2.86	5.86	1.26	0.13	10.13

4.10.2 Predicción de Throughput

En la figura 34 se observan las muestras por pixeles que toma Atoll por el throughput alcanzado. Para esta predicción se obtuvo un 67.44% del área total en niveles Peak RLC Channel Throughput (DL)(kbps) mayor a 20,480 kbps. Los resultados se detallan en el histograma generado.

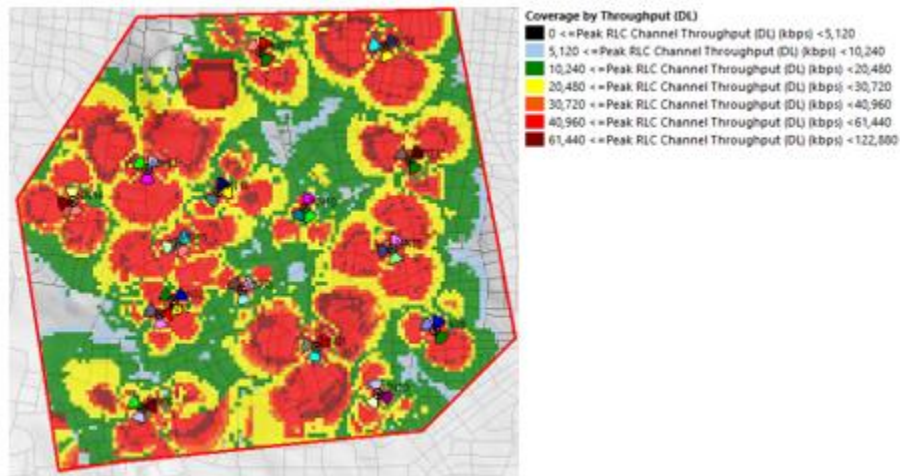
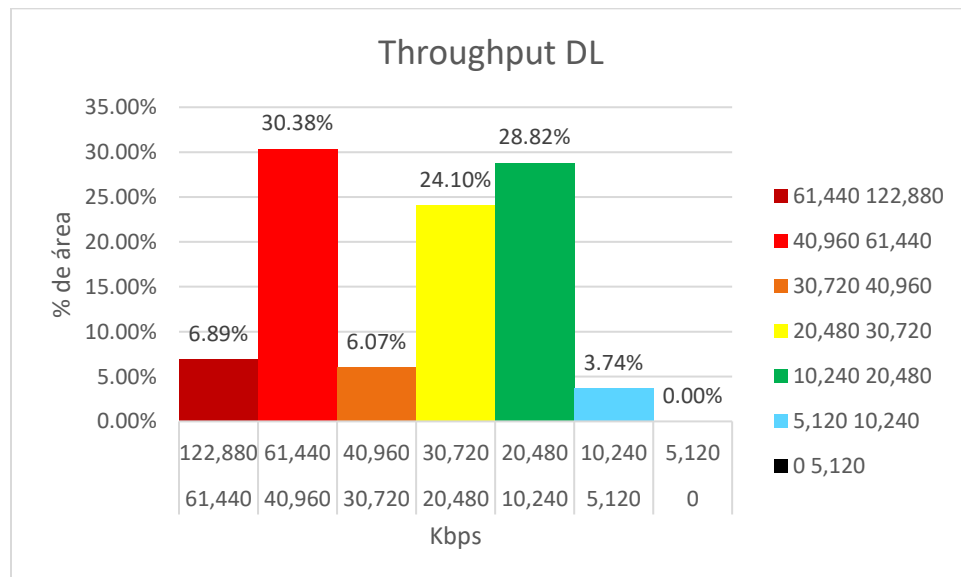


Figura 34. Predicción de throughput para toda la red. Elaboración propia.

En histograma que se presenta a continuación se logra observar el porcentaje que cubre cada intervalo de Throughput kbps del total de la zona dentro del mapa de tráfico.



Histograma 14. Resultados de Throughput según el porcentaje de área. Elaboración propia.

4.10.3 Predicción de $C/(i+N)$

En la siguiente figura se muestra el resultado de los pixeles que considera Atoll para cada intervalo de $C/(i+N)$. En total se obtiene que los rangos mayores a 11 dB representan el 46.43% de toda el área.

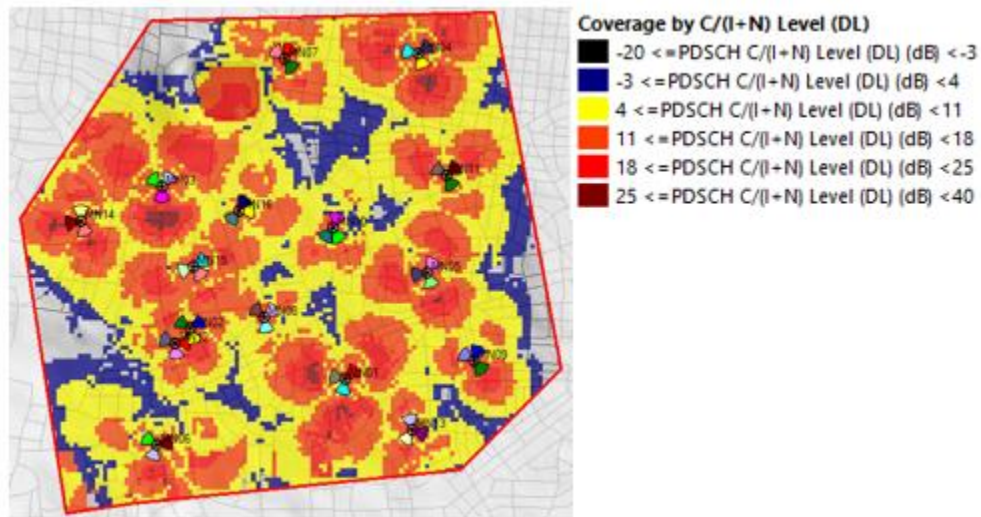
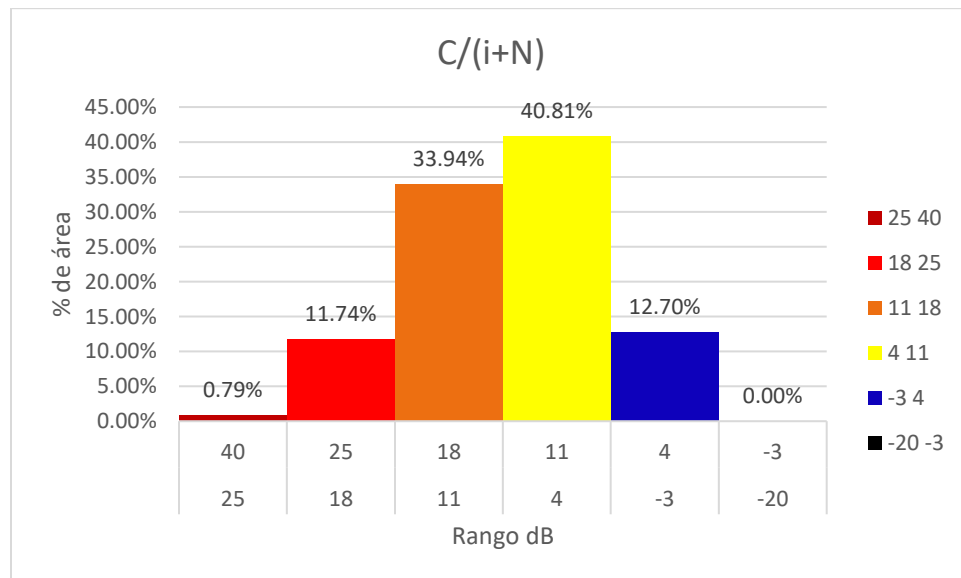


Figura 35. Predicción $C/(i+N)$ para toda la red. Elaboración propia.

Para apreciar mejor el resultado por intervalo $C/(i+N)$ se obtienen el mismo a través de un histograma en el cual se observa el porcentaje que se obtuvo según el porcentaje total de área.



Histograma 15. Resultado de $C/(i+N)$ para enlace DL. Elaboración propia.

4.11 Implementación de estrategias de mitigación de interferencia

En la siguiente sección se abordará la implementación y aplicación de las estrategias de mitigación de interferencia sobre los escenarios creados por las simulaciones Monte Carlo.

4.11.1 Estrategia de Coordinación de Interferencia Inter Celda ICIC

La coordinación de interferencias entre células es un medio de mejorar la calidad de la señal en los bordes de las células mediante el uso de recursos diferentes en los bordes de células potencialmente interferentes entre sí [32].

Es importante mencionar que, aunque se denomine ICIC a la estrategia de gestión de interferencias entre celdas, existen diferentes formas de hacer dicha gestión. Una de ellas es la empleada por Atoll, la cual está basada en el reúso de frecuencias estático, y consiste en utilizar todo el canal asignado en el centro de la zona de cobertura de la celda y sólo una porción del mismo en el borde; cada porción tendría que ser distinta entre celdas contiguas para poder reducir de esta forma las interferencias.

Para este proyecto se utilizará la Gestión estática en el software Atoll. La versión de Atoll utilizada en este proyecto soporta diferentes tipos de ICIC estática usando reúso fraccional de frecuencia como Hard Reuse, Partial Reuse, Soft Reuse y FFR-Time divided [4].

Para cada tipo de reúso fraccional de frecuencia Atoll realiza una división de zonas de un sector entre borde y centro de celda de tal manera que al aplicar una de las técnicas ICIC el software asignará los recursos de radio o PRBs según la zona (borde o centro).

Desde este punto es importante saber que considera Atoll un borde o un centro de celda. Esto último se realiza a través de un valor de umbral fijo llamado ICIC Delta Path Loss, que se define para un píxel del mapa como la diferencia de path loss (en dB) entre el segundo y el primer mejor servidor, si la diferencia es menor que el valor establecido de ICIC Delta Path Loss desde la configuración de celdas ese píxel es considerado del borde de celda, de lo contrario es del centro de celda [30].

4.11.2 Predicción Delta Path Loss

Para establecer en la tabla de celdas un valor para ICIC Delta Path Loss, podemos primeramente observar que zonas en el mapa tienen valores de delta path loss cercanos a 1 dB y si en estas zonas converge la transmisión de 2 o más sectores. Para hacer esto posible se realiza la predicción Effective Signal Analysis (DL).

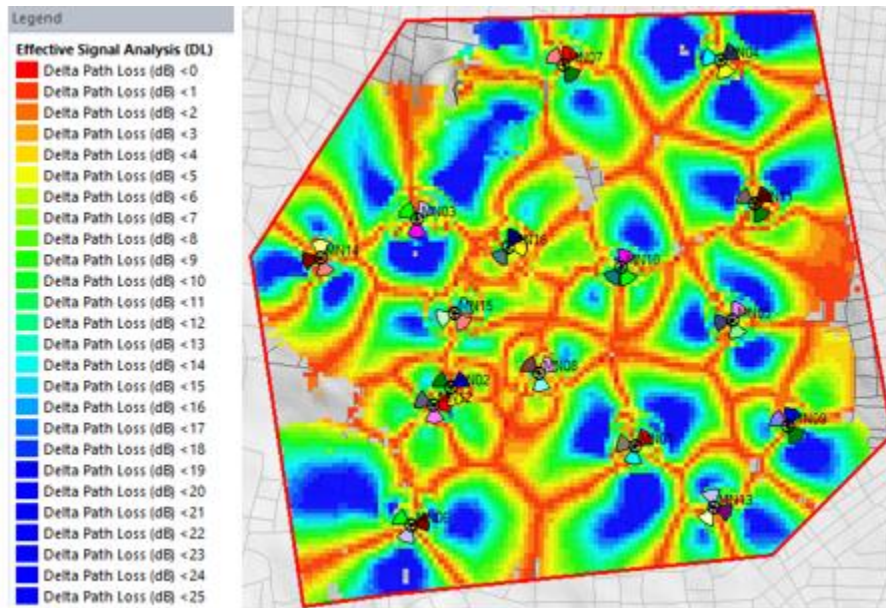


Figura 36. Predicción Delta Path Loss. Elaboración propia.

Como podemos observar en la figura 36, los colores rojizos representan valores de delta path loss cercanos a 1 dB, y por lo tanto donde la señal del segundo servidor está muy próxima a la del mejor servidor, por lo que es donde posiblemente existan mayores niveles de interferencia [4]. De la misma manera se observa que existe una zona en la que converge la propagación de sectores de los sitios MN08, MN02 y MN15 y se encuentran valores de delta path loss de 5dB. Considerando esta zona se tomará un valor de ICIC Delta Path Loss de 5dB.

4.11.3 Configuración de ICIC Delta Path Loss Threshold

Una vez se obtiene la simulación delta path loss se establece el umbral. Para este proyecto se toma un umbral de 5 dB, es decir, los valores menores a 5 dB en el mapa serán considerados bordes de celdas y mayores a este umbral serán considerados como centros de celda. Para establecer este valor debemos ingresar a la configuración de celdas y ubicar el parámetro ICIC Delta Path Loss Threshold (dB), este umbral se establece para todas las celdas.

Una vez definimos en Atoll lo considera borde y centro de celda debemos realizar la división de los recursos de radio o PRBs entre estas dos zonas. Este proceso se realiza desde la configuración de Frames en Atoll como será explicado posteriormente.

4.11.4 Configuración de Frames en Atoll

Antes de abordar la configuración de la tabla de Frames en Atoll es importante recordar que los bloques de recursos son divididos según sea el reúso de frecuencia. En la siguiente figura se repasa los tipos de reúso de frecuencia para la estrategia ICIC en Atoll.

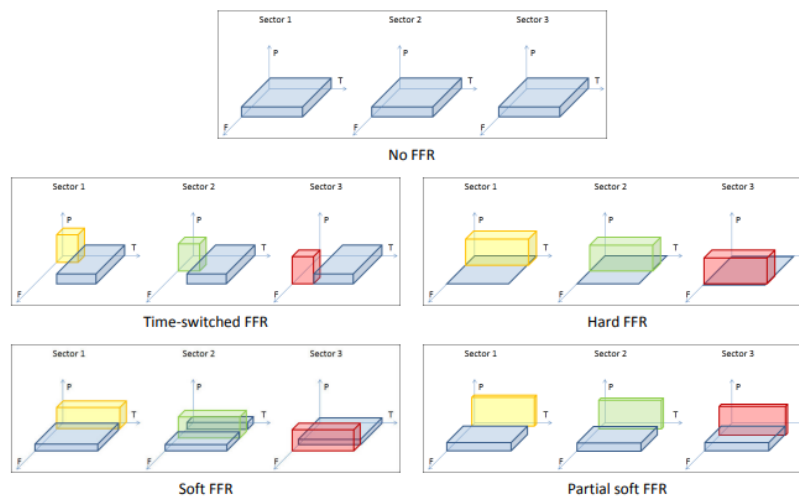


Figura 37. Estrategias ICIC en Atoll [32].

En la figura 37 se muestra el reúso para Time-switched FFR, Hard FFR, Soft FFR y Partial soft FFR. En el FFR Time-switched, toda la potencia se concentra en algunos de los bloques de recursos durante una parte de la trama, mientras que otros no se

transmiten en absoluto. Durante el resto de la trama, se transmite la misma potencia en todos los bloques de recursos. Los bordes de las celdas vecinas se cubren con bloques de recursos diferentes para evitar interferencias.

En el FFR Hard, toda la potencia se concentra en algunos de los bloques de recursos, mientras que otros no se transmiten en absoluto. Las células vecinas utilizan bloques de recursos diferentes para evitar interferencias en toda la zona de cobertura.

En el FFR Soft, algunos bloques de recursos se transmiten a mayor potencia que otros. Los bordes de las celdas vecinas se cubren por bloques de recursos diferentes para evitar interferencias.

En el FFR Partial soft, algunos bloques de recursos se transmiten a mayor potencia que otros, y algunos no se transmiten en absoluto. Los bordes de las celdas vecinas se cubren con distintos bloques de recursos para evitar interferencias.

En la siguiente figura se muestra la configuración de tab Frame Configuration en Atoll para las diferentes estrategias de ICIC mencionadas anteriormente. Para cada una de las estrategias se utiliza 3 grupos de bloques de frecuencia o bien grupos de PRBs. Como se puede observar se han creado nuevos Frames con los nombres Hard, Partial Reuse, Soft Reuse y se han asignado la cantidad de PRBs para cada grupo. Para cada configuración se tiene la misma cantidad de PRBs para no alterar los resultados en las simulaciones teniendo más o menos recursos de frecuencia en una estrategia.

	Name	Total number of frequency blocks	ICIC mode	Group 0 frequency blocks	Group 1 frequency blocks	Group 2 frequency blocks
	Default 100 RB	100	0 - Time-switched FFR	1-34	35-67	68-100
	Default 15 RB	15	0 - Time-switched FFR	1-5	6-10	11-15
	Default 25 RB	25	0 - Time-switched FFR	1-9	10-17	18-25
	Default 50 RB	50	0 - Time-switched FFR	1-17	18-34	35-50
	Default 6 RB	6	0 - Time-switched FFR	1-2	3-4	5-6
	Hard	75	1 - Hard FFR	1-20	21-40	51-75
	Partial Reuse	75	3 - Partial Soft FFR	1-20	21-40	41-60
	Soft Default 75 RB	75	2 - Soft FFR	1-20	21-40	41-60
►	Time-switched	75	0 - Time-switched FFR	1-20	21-40	41-60
*						

Figura 38. Configuración de Frames en Atoll. Elaboración propia.

En la figura 38 se observan los grupos de frecuencia 0, 1 y 2 según el PSS asignado a la celda respectivamente. En este caso, la celda hará uso de uno de los grupos en dependencia de valor de PSS que la misma obtiene en el proceso de establecimiento de PCI o identificador de celda. En caso que la celda utilice el grupo 0 de bloque de frecuencia, esta hará uso de la cantidad de PRBs asignados en el grupo específico para los usuarios ubicados bordes de celda [32]. Por último, Atoll asignará los recursos en los bordes de celdas reconocidos por Atoll a través del umbral ICIC delta Path Loss Threshold.

4.12 Resultados de las estrategias ICIC

En este apartado se observarán los resultados al aplicar las estrategias ICIC para los escenarios creados en las simulaciones de Monte Carlo. Con los resultados obtenidos se podrá identificar que estrategia actúa mejor según el escenario o si para ambos escenarios se tienen buenos resultados en throughput para una misma estrategia.

4.12.1 Resultados de la estrategia ICIC primer escenario

En la siguiente tabla se muestran los resultados totales de cada simulación según la estrategia ICIC. Adicionalmente se ha colocado la columna Sin ICIC, misma que hace referencia a los resultados del primer escenario antes de aplicar las estrategias ICIC. En la tabla se puede observar la cantidad de usuarios conectados como las velocidades pico y promedio que son alcanzadas por la demanda de los usuarios para la simulación correspondientes a cada estrategia.

Tabla 17. Resultados de estrategia ICIC primer escenario. Elaboración propia.

Descripción	Sin ICIC	ICIC-Hard	ICIC-Partial	ICIC-Soft	ICIC Time-switched
Usuarios totales conectados	297.67	297.87	293.4	293.87	299.67
Usuarios para enlace DL	161.27	160.93	160	159.73	160.87
Usuarios para enlace UL	92	93.07	90.33	89.53	93.13
Usuarios para DL+UL	29.47	28.8	28.2	29.33	30.53
Usuarios inactivos	14.93	15.07	14.87	15.27	15.13
Usuarios fuera de cobertura	43.33	40.87	43.33	43.73	41.73
Usuarios sin servicio	37.2	39.67	41.87	40.6	36
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	310.08	297.27	269.05	340.9	344.38
Effective RLC Cumulated Throughput (DL)	306.04	293.44	265.68	336.13	339.81
Cumulated Application Throughput (DL)	290.74	278.77	252.39	319.33	322.82
Peak RLC Cumulated Throughput (UL)	32.78	31.53	29.02	30.74	32.17
Effective RLC Cumulated Throughput (UL)	32.24	31.04	28.5	30.28	31.57
Cumulated Application Throughput (UL)	30.62	29.49	27.08	28.76	29.99

Como se observa en la tabla hay mejoras significativas para el Peak RLC Cumulated throughput obtenido en enlace DL y UL al utilizar las estrategias ICIC-Soft e ICIC Time-switched. Sin embargo, no se tiene una mejora para el enlace UL con las estrategias. En conclusión, se obtienen los mejores resultados de throughput para el enlace DL se consigue con la estrategia ICIC Time-switched alcanzando 344.38 Mbps.

4.12.2 Resultados de la estrategia ICIC segundo escenario

Como fue abordado anteriormente, nuevamente se generan los resultados a través de tabla para una mejor interpretación. La información obtenida es en referencia al escenario con el 70% de los usuarios anteriormente planteados para este estudio.

Tabla 18. Resultados de estrategia ICIC segundo escenario. Elaboración propia.

Descripción	Sin ICIC	ICIC-Hard	ICIC-Partial	ICIC-Soft	ICIC Time-switched
Usuarios totales conectados	210.87	210.87	212	210.47	209.2
Usuarios para enlace DL	115.13	116	116.07	115.93	114
Usuarios para enlace UL	65.6	65.47	64.87	64.2	65.13
Usuarios para DL+UL	21.27	19.93	21.73	21.27	20.47
Usuarios inactivos	8.87	9.47	9.53	9.07	9.6
Usuarios fuera de cobertura	31.13	30.6	31.87	31.27	31.4
Usuarios sin servicio	29.53	30.4	27.33	29.07	30.73
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	230.53	235.82	230.21	265.42	253.03
Effective RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	227.5	232.49	227.37	262.16	249.72
Cumulated Application Throughput Mbps (DL)	216.12	220.87	216	249.05	237.24
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)	23.17	23.51	22.52	24.78	24.35
Effective RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)	22.75	23.11	22.15	24.38	23.96
Cumulated Application Throughput Mbps (UL)	21.62	21.95	21.04	23.16	22.76

Como se observa en la tabla hay mejoras significativas para el throughput obtenido en enlace DL y UL al utilizar las estrategias ICIC-Hard, ICIC-Soft e ICIC Time-switched. Para la estrategia ICIC-Partial no se obtiene una mejora para ambos enlaces, en su lugar baja ligeramente los niveles obtenidos en la simulación sin ICIC. En este resultado la mejor estrategia es ICIC-Soft con el que se alcanza un valor de Peak RLC Cumulated throughput de 265.42 Mbps.

4.13 Estrategia Single User Multiple Input Multiple Output SU-MIMO

SU-MIMO consiste en emplear más de una antena de transmisión para enviar diferentes señales (data streams) por cada una. El receptor a su vez puede emplear más de una antena para recibir las distintas señales. Al utilizar SU-MIMO con M antenas transmisoras y N antenas receptoras, teóricamente se incrementa el throughput M o N veces, según el valor menor, en el enlace del transmisor al receptor. Con esto se logra aumentar la capacidad del canal para una $C/(I+N)$ dada [1]. Con SU-MIMO lo que se busca es mejorar e incrementar la capacidad del enlace eNodeB y el equipo de usuario UE. Específicamente, a la multiplexación espacial se le denomina Single User MIMO (SU-MIMO). Con SU-MIMO obtenemos un incremento de la tasa de datos mediante la creación de varios canales paralelos para un terminal único [33].

Al igual que en el caso de diversidad en transmisión y recepción, en Atoll se puede definir independientemente para cada celda si se emplea SU-MIMO y las ganancias se definen en los equipos de recepción en función del número de antenas transmisoras y receptoras, movilidades, Radio Bearers y BLER. Durante los cálculos de las simulaciones, los usuarios que utilicen un terminal MIMO y que estén conectados a una celda que emplee SU-MIMO verán incrementados sus Channel Throughput dependiendo de la $C/(I+N)$ de los canales PDSCH o PUSCH [1].

4.13.1 Resultados de la estrategia SU-MIMO primer escenario

En la tabla 19 se observan los resultados obtenidos al utilizar la estrategia de diversidad SU-MIMO con configuraciones de 4x2 y 4x4. Cada combinación corresponde al número de puertos utilizados en la antena para Tx y Rx.

Tabla 19. Resultados de la estrategia SU-MIMO primer escenario. Elaboración propia.

Descripción	Sin SU-MIMO	SU-MIMO 4X2	SU-MIMO 4X4
Usuarios totales conectados	297.67	297.27	327.8
Usuarios para enlace DL	161.27	160.93	175.2
Usuarios para enlace UL	92	91.33	102.67
Usuarios para DL+UL	29.47	29.87	33.4
Usuarios inactivos	14.93	15.13	16.53
Usuarios fuera de cobertura	43.33	38.2	39.47
Usuarios sin servicio	37.2	42.53	11.8
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	310.08	303.05	309.74
Effective RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	306.04	297.73	304.91
Cumulated Application Throughput Mbps (DL)	290.74	282.85	289.67
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)	32.78	31.77	44.03
Effective RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)	32.24	31.25	43.39
Cumulated Application Throughput Mbps (UL)	30.62	26.69	41.22

Como se observa para SU-MIMO 4x2 se tiene que 297.27 usuarios se conectan a la red, mientras que con SU-MIMO 4x4 se tienen 327.8 usuarios conectados, caso contrario al no utilizar la estrategia, ya que se logran conectar a la red 297.67 usuarios. Por lo tanto, al tener un arreglo 4x4 se tienen más usuarios conectados a la red.

Para el Peak RLC Cumulate Throughput en el enlace downlink se tienen los resultados 310.08 Mbps sin utilizar la estrategia, 303.05 con SU-MIMO 4x2 y 309.74 Mbps para SU-MIMO 4x4. En conclusión, para este enlace no se consigue una mejora para el enlace descendente.

Para el Peak RLC Cumulated Throughput en enlace uplink se tiene los resultados 32.78 Mbps sin estrategia, 31.77 con SU-MIMO 4x2 y 44.03 Mbps con SU-MIMO 4x4. En conclusión, para esta última configuración se consigue mejores resultados para este enlace.

4.13.2 Resultados de la estrategia SU-MIMO segundo escenario

En la tabla 20 se observan los resultados obtenidos al utilizar la estrategia de diversidad SU-MIMO con configuraciones de 4x2 y 4x4. Cada combinación corresponde al número de puertos utilizados en la antena para Tx y Rx.

Tabla 20. Resultados de estrategia SU-MIMO segundo escenario. Elaboración propia.

Descripción	Sin SU-MIMO	SU-MIMO 4X2	SU-MIMO 4X4
Usuarios totales conectados	210.87	210.67	235.93
Usuarios para enlace DL	115.13	114.73	127.27
Usuarios para enlace UL	65.6	66.2	73.73
Usuarios para DL+UL	21.27	20.27	24.07
Usuarios inactivos	8.87	9.47	10.87
Usuarios fuera de cobertura	31.13	28.67	27.73
Usuarios sin servicio	29.53	31.6	8.73
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	230.53	234.81	240.26
Effective RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	227.5	231.13	236.72
Cumulated Application Throughput Mbps (DL)	216.12	219.58	224.89
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)	23.17	22.7	34.59
Effective RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)	22.75	22.31	34.17
Cumulated Application Throughput Mbps (UL)	21.62	21.19	32.46

Como se observa para SU-MIMO 4x2 se tiene que 210.67 usuarios se conectan a la red, mientras que con SU-MIMO 4x4 se tienen 235.93 usuarios conectados, caso contrario al no utilizar la estrategia, ya que se logran conectar a la red 210.87 usuarios. Por lo tanto, al tener un arreglo 4x4 se tienen más usuarios conectados a la red.

Para el Peak RLC Cumulate Throughput en el enlace downlink se tienen los resultados 230.53 Mbps sin utilizar la estrategia, 234.81 Mbps con SU-MIMO 4x2 y 240.26 Mbps para SU-MIMO 4x4. En conclusión, se obtiene una mejora para el enlace descendente al utilizar cualquier configuración SU-MIMO.

Para el Peak RLC Cumulated Throughput en enlace uplink se tiene los resultados 23.17 Mbps sin estrategia, 22.7 Mbps con SU-MIMO 4x2 y 34.59 Mbps con SU-MIMO 4x4. En conclusión, para esta última configuración se consigue mejores resultados para este enlace.

4.14 Estrategia de variación de Tilt Eléctrico/Mecánico

También conocido como ángulo de inclinación de la antena, la variación del tilt busca reducir la interferencia inter celda y de esta manera optimizar las redes en términos de cobertura y capacidad. Existen dos tipos de inclinación de la antena: tilt mecánico y tilt eléctrico, el primero varía físicamente la inclinación de la antena, mientras que el segundo método de variación de la inclinación se realiza ajustando la fase de los diferentes segmentos eléctricamente. Es importante mencionar que las variaciones de tilt pueden realizarse de -5 hasta 20 grados.

Para las variaciones de tilt eléctrico y mecánico se tomaron aquellos sectores donde su propagación estaba limitada y donde en la zona en el mapa prevalecía niveles de throughput menores a 10,240 kbps. En la siguiente tabla se observan los sectores los cuales se realizaron cambios en la inclinación de la antena.

Tabla 21. Variaciones de tilt eléctrico y mecánico. Elaboración propia.

Sector	Inclinación previa a estrategia	Inclinación posterior a la estrategia
MN10_A	2° tilt eléctrico, 2° tilt mecánico	5° tilt eléctrico, 3° tilt mecánico
MN07_B	4° tilt eléctrico, 0° tilt mecánico	1° tilt eléctrico, 2° tilt mecánico
MN16_A	3° tilt eléctrico, 3° tilt mecánico	4° tilt eléctrico, 2° tilt mecánico
MN16_B	2° tilt eléctrico, 3° tilt mecánico	3° tilt eléctrico, 1° tilt mecánico

Como se observa en la tabla se tomaron los sectores MN10_A, MN07_B, MN16_A y MN16_B. Estos sectores tienen un área en común en su propagación donde antes de la optimización se obtenían valores de bajos niveles de throughput. Una vez se realizaron estos cambios desde la tabla de transmitters se realizaron las simulaciones para los dos escenarios de red como ha sido aplicado en las estrategias anteriores.

4.14.1 Resultados de la estrategia Tilt primer escenario

En la siguiente tabla se detallan los resultados al implementar esta estrategia de mitigación de interferencia. Como se logra observar en la tabla se tiene una ligera mejora del throughput en el enlace DL, sin embargo, para el enlace UL el throughput disminuye.

Tabla 22. Resultados con estrategia de variaciones de inclinación de antena primer escenario. Elaboración propia.

Descripción	Sin estrategia	Con estrategia Tilt
Usuarios totales conectados	297.67	298.4
Usuarios para enlace DL	161.27	159.8
Usuarios para enlace UL	92	92.73
Usuarios para DL+UL	29.47	30.27
Usuarios inactivos	14.93	15.6
Usuarios fuera de cobertura	43.33	39.73
Usuarios sin servicio	37.2	39.27
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	310.08	313.64
Effective RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	306.04	309.77
Cumulated Application Throughput Mbps (DL)	290.74	294.28
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)	32.78	31.87
Effective RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)	32.24	31.3
Cumulated Application Throughput Mbps (UL)	30.62	29.73

Para esta estrategia de Tilt es importante considerar la cobertura de la red. Esto es debido a se han inclinado los sectores de tal manera que su foco de propagación sea más centrado, lo que llevaría a reducir el área de cobertura, sin embargo, como se puede apreciar en los usuarios fuera de cobertura hay una mejora, este resultado puede deberse a que la cobertura para usuarios próximos a la celda se ha mejora, incluso al inclinar más las antenas podemos cubrir huecos de cobertura cercanos a la celda. Para esta estrategia el Peak RLC Cumulated throughput DL se mejora de 310.08 Mbps a 313.64 Mbps. Para el enlace UL se reduce ligeramente, sin embargo, podemos considerar que esta estrategia da buenos resultados.

4.14.2 Resultados de la estrategia Tilt segundo escenario

En la siguiente tabla se observan los resultados obtenidos para el escenario de 70%. Para este escenario se tiene una mejora en los valores obtenidos de throughput tanto para el enlace DL y el enlace UL, por lo tanto, se tiene una mejora para la red.

Tabla 23. Resultados con estrategia de variaciones de inclinación de antena segundo escenario. Elaboración propia.

Descripción	Sin estrategia	Con estrategia Tilt
Usuarios totales conectados	210.87	214.73
Usuarios para enlace DL	115.13	117.47
Usuarios para enlace UL	65.6	67.2
Usuarios para DL+UL	21.27	20.73
Usuarios inactivos	8.87	9.33
Usuarios fuera de cobertura	31.13	29.53
Usuarios sin servicio	29.53	27.67
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	230.53	234.82
Effective RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	227.5	231.77
Cumulated Application Throughput Mbps (DL)	216.12	220.18
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)	23.17	26.65
Effective RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)	22.75	26.19
Cumulated Application Throughput Mbps (UL)	21.62	24.88

A diferencia del primer escenario para el segundo escenario se obtiene una mejora para el throughput en los enlaces DL y UL. Para el valor de Peak RLC Cumulated throughput DL se mejora de 230.53 Mbps a 234.82 Mbps y para el valor Peak RLC Cumulated throughput UL se mejora de 23.17 Mbps a 26.65 Mbps.

Capítulo V. Análisis de resultados por escenario

En el este capítulo se abordará la eficiencia de las estrategias de mitigación de interferencia a través de los resultados obtenidos para dos escenarios de red dados. Se determinará la estrategia más eficiente según los valores de throughput y $C/(i+N)$ (DL). Los resultados serán presentados por medio de histogramas y tablas para una mejor comprensión para cada escenario.

5.1 Análisis de throughput primer escenario de red

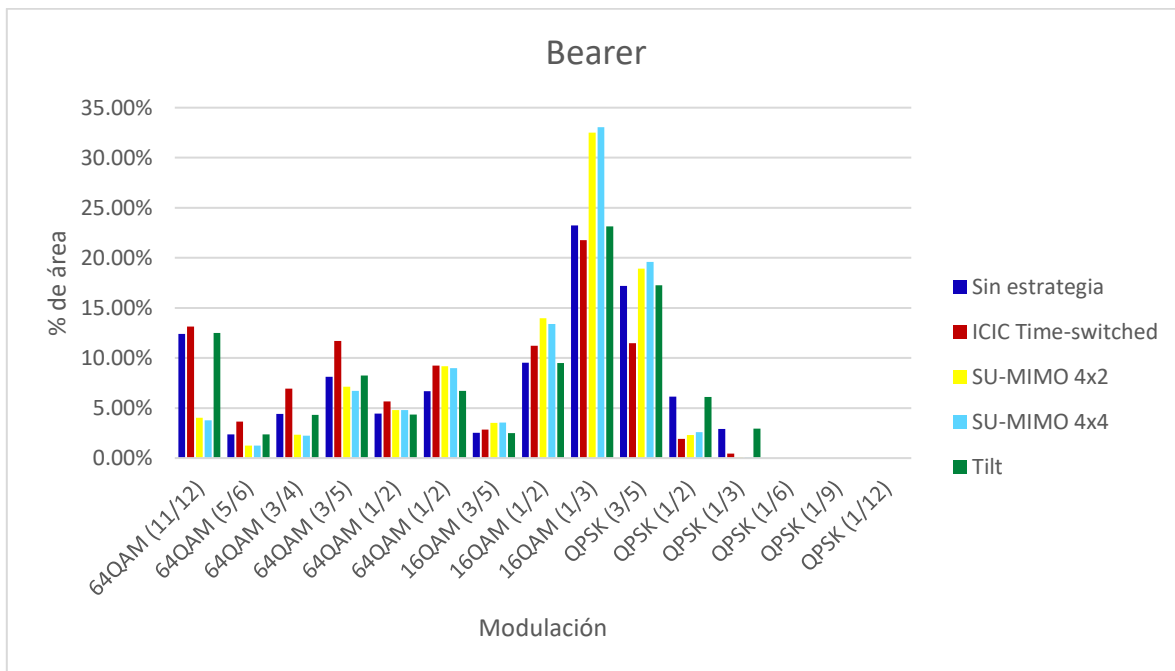
Primeramente, se realiza una comparación de todas las estrategias a través de tablas para observar cual ha sido las más eficiente en las variables que contiene la tabla 24. Como se logra observar para el primer escenario, la estrategia que mejora los niveles de throughput para los usuarios en la red es la ICIC Time-switched, ya que se tiene un valor de Peak RLC Cumulated Throughput de 344.38 Mbps para el enlace downlink, a diferencia del throughput obtenido sin aplicar ninguna estrategia que es igual a 310.08 Mbps para el mismo enlace. De esta manera se obtuvo una mejora del 11.06%. Para el Peak RLC Cumulated Throughput en el enlace uplink la estrategia que mejora la velocidad de datos es al SU-MIMO 4x4, esto es debido a que se está utilizando 4 puertos para la recepción de copias de la señal original desde el equipo de usuario hacia el eNodeB. Esta configuración de SU-MIMO entrega 44.03 Mbps, comparado con valor obtenido sin aplicar estrategia siendo este de 32.78 Mbps, se tiene una mejora del 34.31%. A pesar que tenemos una mejora significativa para este enlace con esta última estrategia, para este trabajo nos enfocaremos sobre las velocidades alcanzadas en el enlace downlink. Otras 2 estrategias que mejoran los niveles de throughput son ICIC-Soft con 340.9 Mbps o 9.9% y la estrategia Tilt con 313.64 Mbps o bien 1.1%.

Tabla 24. Resultados de simulación Monte Carlo para todas las estrategias de mitigación. Elaboración propia.

Descripción	Sin estrategia	ICIC-Hard	ICIC-Partial	ICIC-Soft	ICIC Time-switched	SU-MIMO 4X2	SU-MIMO 4X4	Tilt Eléctrico/Mecánico
Usuarios totales conectados	297.67	297.87	293.4	293.87	299.67	297.27	327.8	298.4
Usuarios para enlace DL	161.27	160.93	160	159.73	160.87	160.93	175.2	159.8
Usuarios para enlace UL	92	93.07	90.33	89.53	93.13	91.33	102.67	92.73
Usuarios para DL+UL	29.47	28.8	28.2	29.33	30.53	29.87	33.4	30.27
Usuarios inactivos	14.93	15.07	14.87	15.27	15.13	15.13	16.53	15.6
Usuarios fuera de cobertura	43.33	40.87	43.33	43.73	41.73	38.2	39.47	39.73
Usuarios sin servicio	37.2	39.67	41.87	40.6	36	42.53	11.8	39.27
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	310.08	297.27	269.05	340.9	344.38	303.05	309.74	313.64
Effective RLC Cumulated Throughput (DL)	306.04	293.44	265.68	336.13	339.81	297.73	304.91	309.77
Cumulated Application Throughput (DL)	290.74	278.77	252.39	319.33	322.82	282.85	289.67	294.28
Peak RLC Cumulated Throughput (UL)	32.78	31.53	29.02	30.74	32.17	31.77	44.03	31.87
Effective RLC Cumulated Throughput (UL)	32.24	31.04	28.5	30.28	31.57	31.25	43.39	31.3
Cumulated Application Throughput (UL)	30.62	29.49	27.08	28.76	29.99	26.69	41.22	29.73

5.2 Analisis de Bearer (DL)

Adicionalmente de observar el Peak RLC Comulated Throughput que se obtuvo podemos observar la técnica de modulación en relación al porcentaje de área cubierta. En el siguiente gráfico se logra identificar la modulación alcanzada por cada una de las estrategias. Como se logra observar en el eje X se tiene rangos que representan el tipo de modulación MCS mientras que el eje Y muestra el porcentaje del área cubierta.



Histograma 16. Modulación obtenida por área para cada estrategia. Elaboración propia.

Al no utilizar ninguna estrategia se tiene que un 38.43% del área cuenta con modulación 64QAM, para la estrategia ICIC Time-switched se obtuvo el 50.33%, para SU-MIMO 4x2 se obtuvo 28.72%, para SU-MIMO 4x4 se obtuvo el 27.77%, por último, para la estrategia de tilt se obtuvo el 38.52%. Para esta modulación se consigue los mejores resultados al utilizar la estrategia ICIC Time-switched.

Además de realizar un análisis por el porcentaje del área cubierta por una técnica de modulación podemos obtener información por Km^2 que alcanza la misma considerando toda el área estudiada por la predicción. En la siguiente tabla se observa la distancia que abarca la modulación 64QAM y 16QAM.

Tabla 25. Modulación por Km^2 . Elaboración propia.

Estrategia	64QAM	16QAM
Sin estrategia	3.95 km^2	3.63 km^2
ICIC Time-switched	5.1 km^2	3.68 km^2
SU-MIMO 4x2	2.9 km^2	5.2 km^2
SU-MIMO 4x4	2.9 km^2	5.2 km^2
Tilt eléctrico/mecánico	3.96 km^2	3.61 km^2

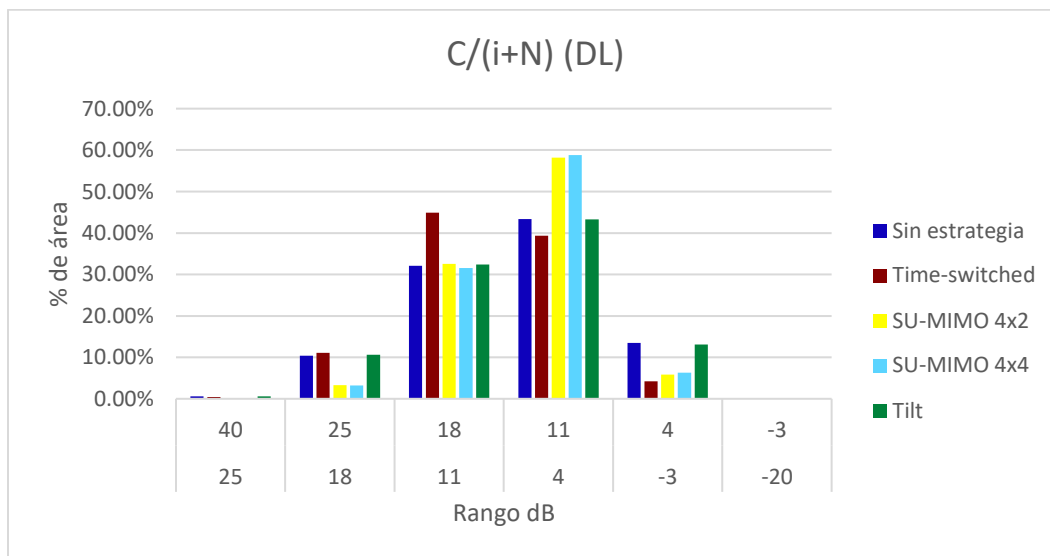
Como se observa al no aplicar ninguna estrategia se tiene 3.95 km^2 , la estrategia que más distancia abarca con la modulación 64QAM es la ICIC Time-switched con 5.1 km^2 . Para la estrategia de tilt se observa que su rango es muy similar al no aplicar ninguna estrategia, por tanto, no se obtiene una distancia considerable utilizando la estrategia tilt, sin embargo, como se logró ver en la tabla 24 se obtuvieron mejores niveles de throughput. Para SU-MIMO 4x2 y 4x4 se consigue el mismo valor siendo de 2.9 km^2 . Para el caso de la modulación 16QAM se tiene que 3.63 km^2 se consigue sin utilizar ninguna estrategia. Para esta 16QAM se tiene abarca más distancia con SU-MIMO, alcanzando hasta 5.2 km^2 . A pesar que se tenemos una mayor área cubierta con 16QAM con SU-MIMO, nos daremos cuenta que al sumar la distancia entre 64QAM y 16QAM, la estrategia que nos entrega los mejores resultados es ICIC Time-switched.

5.3 Análisis de C/(i+N) (DL)

En esta sección se abordará el resultado para el parámetro de C/(i+N) de las estrategias aplicadas para el primer escenario de red. Se tendrán los resultados por medio de una tabla y un gráfico para tener mejor comparación de los resultados. En la tabla 26 se observa el intervalo para los niveles de C/(i+N) (DL) y el porcentaje obtenido en toda la red.

Tabla 26. Resultados de C/(i+N) para DL. Elaboración propia.

Intervalo		Sin estrategia	ICIC Time-switched	SU-MIMO 4x2	SU-MIMO 4x4	Tilt
MENOR (dB)	MAYOR (dB)					
25	40	0.63%	0.44%	0.08%	0.01%	0.62%
18	25	10.43%	11.09%	3.32%	3.19%	10.65%
11	18	32.11%	44.88%	32.56%	31.59%	32.41%
4	11	43.34%	39.38%	58.16%	58.79%	43.25%
-3	4	13.48%	4.20%	5.86%	6.34%	13.07%
-20	-3	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%



Histograma 17. Niveles de C/(i+N). Elaboración propia.

Para el análisis de C/(i+N) dB nos enfocaremos en los rangos donde tenemos afectación de interferencia los cuales son de -3 dB a 4 dB y de -20 dB a -3 dB. La importancia de enfocarnos en estos rangos es para observar si el porcentaje de muestras disminuye, lo que se traduce a tener un menor porcentaje de zonas

afectadas por interferencia siendo este el objetivo al aplicar las estrategias de mitigación de interferencia.

Como se muestra en la tabla 26 al no aplicar ninguna estrategia se tiene que un 13.48% del área se encuentra en rangos de -3 dB a 4 dB. Al aplicar la estrategia ICIC Time-switched este porcentaje baja a 4.20%, para la estrategia SU-MIMO 4x2 también se consigue reducir este porcentaje a 5.86%, para SU-MIMO 4x4 se reduce a 6.34%, por último, para la estrategia de tilt este porcentaje reduce marginalmente a 13.07%.

5.4 Análisis de usuario en zona de overlapping

En este apartado tomaremos un usuario de muestra que se encuentre ubicado en una zona de overlapping para observar si el throughput para este usuario es específico mejora. En la siguiente tabla se visualiza los resultados para el usuario con Id 134 antes de aplicar las estrategias de mitigación de interferencia.

Tabla 27. Análisis de usuario ubicado en zona de overlapping primer escenario. Elaboración propia.

Descripción	Resultado
Id	134
Coordenadas en X	86° 16' 19.66"W
Coordenadas en Y	12° 7' 51.11"N
Altura (mts)	1.5
Mobility	Fixed
Best Server	MN16C
Serving cell	MN16C (0)
PDSCH C/(i+N) (DL) (dB)	15.24
Bearer	6QPSK (3/5)
Peak RLC Channel Throughput (kbps) (DL)	12,636

Una vez se aplicaron las estrategias de mitigación de interferencia para este usuario se obtuvo los siguientes resultados. Para la estrategia ICIC Time-switch la Peak RLC Channel throughput (DL) mejora de 12,636 kbps a 58,714 kbps. Para el parámetro de C/(i+N) (DL) mantiene en 15.24 dB. Para la estrategia SU-MIMO 4x2 se mejora a 27,706 kbps con un C/(i+N) (DL) 12,03 dB para SU-MIMO 4x4 mejora

a 38,789 kbps con un $C/(i+N)$ (DL) 12,28 dB. Por último, para la estrategia de tilt el usuario experimenta un throughput de 17,691 kbps y un $C/(i+N)$ (DL) de 4.84 dB. Como conclusión, para este usuario se reciben los mejores resultados de Peak RLC Channel Throughput (DL) y $C/(i+N)$ (DL) al utilizar la estrategia de ICIC Time-switched.

5.5 Análisis de throughput segundo escenario

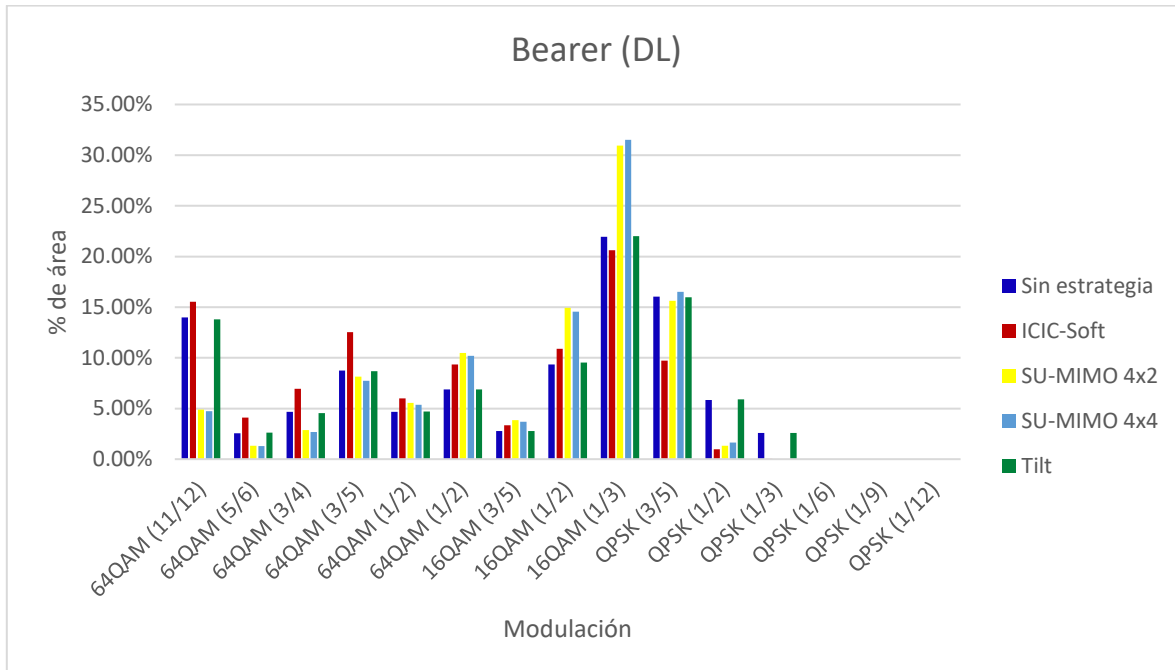
Como se logra observar en la tabla 28 para el segundo escenario se obtuvo mejores resultados de throughput con la estrategia de ICIC-Soft ya que entrega un Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (DL) igual a 265.42 Mbps a diferencia cuando no se aplica ninguna estrategia para este escenario obteniendo un Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (DL) igual a 230.53 Mbps. Con la estrategia ICIC-Soft se tiene una mejora en el throughput de 15.13%. Para el enlace uplink como se observó en el primer escenario, también se consigue una mejora al utilizar SU-MIMO 4x4, ya que entrega 34.59 Mbps a diferencia de no aplicar ninguna estrategia, donde se obtiene 23.17 Mbps, así esta SU-MIMO 4x4 mejora la velocidad en el enlace en un 49%. Otras estrategias que mejoran el nivel de throughput son ICIC-Hard con 235.82 Mbps o 2%, ICIC Time-switched con 253.03 Mbps o 9.7%, SU-MIMO 4x2 con 234.81 Mbps o 1.8%, SU-MIMO 4x4 con 240.26 Mbps o 4.2%, y por último la estrategia de tilt con 234.82 Mbps o bien 1.8%.

Tabla 28. Resultados de simulación Monte Carlo para todas las estrategias de mitigación. Elaboración propia.

Descripción	Sin estrategia	ICIC-Hard	ICIC-Partial	ICIC-Soft	ICIC Time-switched	SU-MIMO 4X2	SU-MIMO 4X4	Tilt Eléctrico/Mecánico
Usuarios totales conectados	210.87	210.87	212	210.47	209.2	210.67	235.93	214.73
Usuarios para enlace DL	115.13	116	116.07	115.93	114	114.73	127.27	117.47
Usuarios para enlace UL	65.6	65.47	64.87	64.2	65.13	66.2	73.73	67.2
Usuarios para DL+UL	21.27	19.93	21.73	21.27	20.47	20.27	24.07	20.73
Usuarios inactivos	8.87	9.47	9.53	9.07	9.6	9.47	10.87	9.33
Usuarios fuera de cobertura	31.13	30.6	31.87	31.27	31.4	28.67	27.73	29.53
Usuarios sin servicio	29.53	30.4	27.33	29.07	30.73	31.6	8.73	27.67
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	230.53	235.82	230.21	265.42	253.03	234.81	240.26	234.82
Effective RLC Cumulated Throughput Mbps (DL)	227.5	232.49	227.37	262.16	249.72	231.13	236.72	231.77
Cumulated Application Throughput Mbps (DL)	216.12	220.87	216	249.05	237.24	219.58	224.89	220.18
Peak RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)	23.17	23.51	22.52	24.78	24.35	22.7	34.59	26.65
Effective RLC Cumulated Throughput Mbps (UL)	22.75	23.11	22.15	24.38	23.96	22.31	34.17	26.19
Cumulated Application Throughput Mbps (UL)	21.62	21.95	21.04	23.16	22.76	21.19	32.46	24.88

5.6 Análisis de Bearer (DL)

Al no utilizar ninguna estrategia se tiene que un 41.49% del área cuenta con modulación 64QAM, para la estrategia ICIC-Soft se obtuvo el 54.43%, para SU-MIMO 4x2 se obtuvo 33.30%, para SU-MIMO 4x4 se obtuvo el 32.06%, por último, para la estrategia de tilt se obtuvo el 41.24%. Para esta modulación se consigue los mejores resultados al utilizar la estrategia ICIC-Soft.



Histograma 18. Modulación obtenida por área para cada estrategia. Elaboración propia.

En la siguiente tabla podremos observar la distancia que abarca la modulación 64QAM y 16QAM en km² para cada una de las estrategias de mitigación de interferencia. Podremos comparar la distancia que se abarca sin utilizar ninguna estrategia de mitigación y usándolas.

Tabla 29. Modulación por Km². Elaboración propia.

Estrategia	64QAM	16QAM
Sin estrategia	4.26 km ²	3.5 km ²
ICIC-Soft	5.59 km ²	3.58 km ²
SU-MIMO 4x2	3.44 km ²	5.14 km ²
SU-MIMO 4x4	3.33 km ²	5.14 km ²
Tilt eléctrico/mecánico	4.24 km ²	3.52 km ²

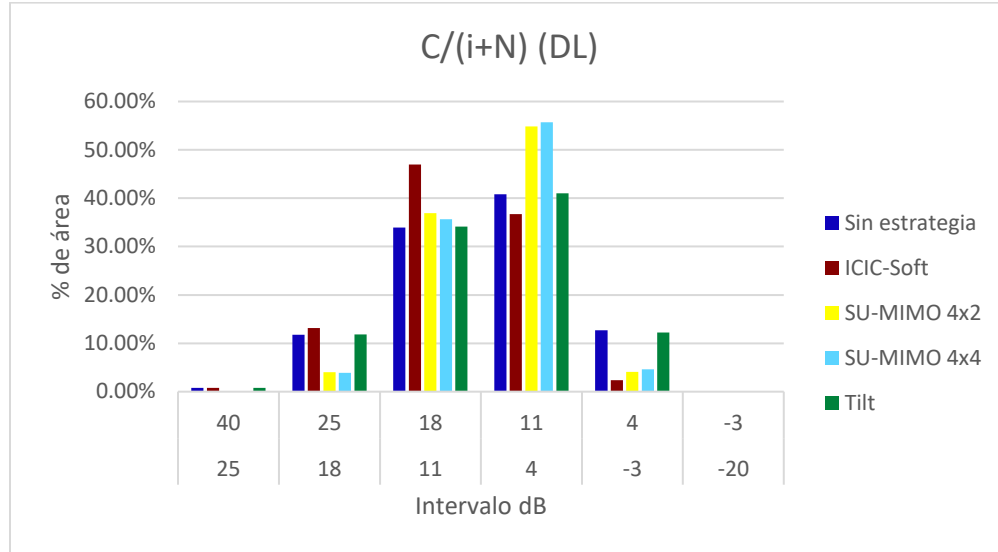
Como se observa sin utilizar ninguna estrategia se obtiene 4.26 km², la estrategia que más distancia abarca con la modulación 64QAM es la ICIC-Soft con 5.59 km². Para la estrategia de tilt se observa que su rango es muy similar al no aplicar ninguna estrategia, por tanto, no se obtiene una distancia considerable utilizando la estrategia tilt. Para SU-MIMO 4x2 se consigue 3.44 km², para SU-MIMO 4x4 se consigue 3.33 km². Para el caso de la modulación 16QAM se tiene que 3.5 km² se consigue sin utilizar ninguna estrategia. Para 16QAM se tiene más distancia con SU-MIMO, alcanzando hasta 5.14 km². A pesar que se tenemos una mayor área cubierta con 16QAM con SU-MIMO, nos daremos cuenta que al sumar la distancia entre 64QAM y 16QAM la estrategia que nos entrega los mejores resultados es ICIC-Soft.

5.7 Análisis de C/(i+N) (DL)

En este apartado se evaluará el resultado de C/(i+N) obtenido para el segundo escenario. En la siguiente tabla se visualiza los rangos en dB que se toman en cuenta para las muestras obtenidas.

Tabla 30. Resultados de C/(i+N) para DL. Elaboración propia.

Intervalo		Sin estrategia	ICIC-Soft	SU-MIMO 4x2	SU-MIMO 4x4	Tilt
MENOR (dB)	MAYOR (dB)					
25	40	0.80%	0.81%	0.14%	0.14%	0.80%
18	25	11.74%	13.16%	4.02%	3.89%	11.80%
11	18	33.95%	46.96%	36.91%	35.67%	34.15%
4	11	40.82%	36.69%	54.83%	55.71%	41.01%
-3	4	12.70%	2.39%	4.09%	4.59%	12.22%
-20	-3	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%



Histograma 19. Niveles de $C/(i+N)$. Elaboración propia.

Como se abordó en el análisis del primer escenario, para el $C/(i+N)$ dB se tomará en cuenta los rangos de -3 dB a 4 dB y -20 dB a -3 dB. Como se observa en la tabla 30, sin aplicar ninguna estrategia se tiene que un 12.70% del área se encuentra en el rango de -3dB a 4 dB. Al aplicar la estrategia ICIC-Soft este porcentaje baja a 2.39%, con la estrategia SU-MIMO 4x2 se reduce a 4.09%, con SU-MIMO 4x4 se reduce a 4.59%, por último, para la estrategia tilt se reduce a 12.22%. En conclusión, la estrategia que más reduce la interferencia es la ICIC-Soft.

5.8 Análisis de usuario en zona de overlapping

En esta sección se analizarán los resultados de throughput y $C/(i+N)$ de un usuario que se encuentra en una zona de overlapping. Se ha tomado un usuario al azar para realizar este análisis. En la siguiente tabla se detallan algunos de los parámetros para este usuario. Como se ha venido trabajando se tomará el parámetro de Peak RLC Cumulated Throughput (DL) y $C/(i+N)$ (dB).

Tabla 31. Análisis de usuario ubicado en zona de overlapping segundo escenario. Elaboración propia.

Descripción	Resultado
Id	95
Coordenadas en X	86° 16' 18.6"W
Coordenadas en Y	12° 7' 53.35"N
Altura (mts)	1.5
Mobility	Fixed
Best Server	MN15A
Serving cell	MN15A (0)
PDSCH C/(i+N) (DL) (dB)	11.64
Bearer	16QPSK (3/5)
Peak RLC Channel Throughput (kbps) (DL)	39,825

Una vez se aplicaron las estrategias de mitigación de interferencia para este usuario se obtuvo los siguientes resultados. Para la estrategia ICIC-Soft 40,313 Mbps mejorando ligeramente la velocidad para este enlace. Para el parámetro de C/(i+N) (DL) se tiene 17.17 dB. Para la estrategia SU-MIMO 4x2 se mejora a 96,204 kbps con un C/(i+N) (DL) 20.22 dB para SU-MIMO 4x4 mejora a 55,436 kbps con un C/(i+N) (DL) 14,28 dB. Por último, para la estrategia de tilt el usuario experimenta un throughput de 17,691 kbps y un C/(i+N) (DL) de 4.84 dB. Como conclusión, para este usuario se reciben los mejores resultados de Peak RLC Channel Throughput (DL) y C/(i+N) (DL) al utilizar la estrategia de SU-MIMO 4x2.

Conclusiones

A lo largo de la ruta de drive test se obtuvo 3,123 muestras. Para el drive test en modo idle se filtraron los valores RSRP para la calibración del modelo de estimación de pérdidas SPM. En los resultados del drive test en modo activo logramos identificar zonas afectadas por interferencia con el parámetro SINR donde el throughput disminuye en gran medida. En las zonas afectadas por interferencia donde se obtuvo valores de SINR en el rango de 4 dB a -3 dB se obtuvo un throughput menor a 30,720 kbps. Por otro lado, para valores de interferencia SINR en los rangos de 4 dB a 11 dB y de 11 dB a 18 dB se alcanzó un throughput mayor a 61,440 kbps. Por lo tanto, se ha evidenciado zonas con bajos niveles de SINR que comprometen la velocidad de datos.

Se creó una red LTE de 16 sitios con 3 sectores cada uno utilizando el software Atoll. Se utilizó la banda 2 de frecuencia ya que es la más utilizada en los despliegues LTE para la zona que se ha escogido, se utilizó el modelo SPM calibrado donde se obtuvo mejores resultados en las predicciones de niveles de señal y simulaciones. Al configurar toda la red se realizaron predicciones de nivel de señal donde se obtuvo que el 1.82% de los niveles de intensidad de señal para toda la red son mayores o igual -80 dBm al tener el SPM calibrado a diferencia de tener la red sin el SPM sin calibrado ya que se obtiene que un 22.14% de toda el área. Para niveles -80 dBm a -90 dBm se obtuvo 21.33% con SPM calibrado y 22.27% sin calibrar. Para los niveles -95 dBm a -90 dBm se obtuvo 22.20% con SPM calibrado y 15.99% sin calibrar. Para los niveles de -95 dBm a -105 dBm se obtuvo un 41.96% del área con SPM calibrado y 23.39% sin calibrar. Por último, para los niveles de -105 dBm a -130 dBm se obtuvo un 12.69% del área con SPM calibrado y un 16.22% sin calibrar.

Se realizó la creación de dos escenarios de red a través de simulaciones Monte Carlo. El primer escenario constó de 700 usuarios por km², mientras que en el segundo escenario se consideraron 490 usuarios por km². Una vez se realizaron los dos escenarios se obtuvo el resultado de simulaciones de tráfico con el algoritmo Monte Carlo.

Una vez se crearon los escenarios de red y se obtuvo sus resultados, se implementaron las estrategias de mitigación de interferencia ICIC, SU-MIMO 4x2 y 4x4 y variaciones de tilt eléctrico y mecánico sobre las simulaciones de los escenarios previamente creados.

Finalmente se comparan las estrategias respecto a su eficiencia utilizando el parámetro Peak RLC Cumulated throughput (DL) y el parámetro $C/(i+N)$ (DL) (dB). Para el primer escenario la mejor estrategia es la ICIC Time-switch ya que entrega un Peak RLC Cumulated throughput de 344.38 Mbps, mejorando el throughput en un 11.06%. También al utilizar esta estrategia se obtuvo la mayor cobertura para la modulación 64QAM ya que se mejoró de 3.95 km² sin estrategia a 5.1 km² para el total del área. También se obtuvo una mejora en el $C/(i+N)$ (DL) (dB), ya que el porcentaje de muestras en el rango de -3 dB a 4 dB se redujo de 13.48% sin estrategia a 4.20% para toda el área.

Para el segundo escenario la mejor estrategia es la ICIC-Soft ya que entrega un Peak RLC Cumulated throughput de 265.42 Mbps, mejorando el throughput en un 15.13%. También al utilizar esta estrategia se obtuvo la mayor cobertura para la modulación 64QAM ya que se mejoró de 4.26 km² sin estrategia a 5.59 km² para el total del área. También se obtuvo una mejora en el $C/(i+N)$ (DL) (dB), ya que el porcentaje de muestras en el rango de -3 dB a 4 dB se redujo de 12.70% sin estrategia a 2.39% para toda el área.

Se concluye que la aplicación de estrategias de mitigación de interferencia puede presentar mejoras en la red en dependencia de la cantidad de usuarios conectados a la misma y del tipo de zona donde se está trabajando. También se concluye que, a pesar que para las estrategias ICIC comprometen la eficiencia espectral en LTE al dividir PRBs en diferentes grupos, hemos observamos que se reciben los mejores resultados para los parámetros tomados para medir su eficiencia.

Recomendaciones

1. Se recomienda realizar un estudio donde se implementen estrategias de mitigación de interferencia utilizando otras bandas de frecuencia como 2100 Mhz y 700 Mhz.
2. Se recomienda realizar un nuevo estudio en esta zona utilizando una estrategia de mitigación de interferencia y diferentes Packet scheduling para observar si al utilizar diferentes Packet scheduling también se consigue una mejora en la red.
3. Se recomienda realizar un estudio de estrategias eICIC para LTE-Advanced.
4. Hacer estudios con programas que permitan recrear escenarios en donde sea aplicado una coordinación de interferencias entre celdas (ICIC) dinámica para poder evaluar completamente el rendimiento de esta estrategia.
5. Utilizar algún otro tipo de software con el fin de comparar los resultados obtenidos y en caso de ser posible explicar las diferencias encontradas.

Bibliografía

- [1] C. E. Guinand Salas, «PLANIFICACIÓN DE UNA RED LTE CON LA HERRAMIENTA ATOLL Y ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS ESTRATEGIAS DE PACKET SCHEDULING,» Barcelona, 2012.
- [2] H. R. Tückler, Redes de acceso de muy alta velocidad e Internet Móvil de Banda Ancha -Tecnologías, regulación y aspectos comerciales-, Managua, 2018.
- [3] P. G. F. I, ««“Estudio para mejorar el aumento de la velocidad de datos en una estación móvil con tecnología LTE basado en Segunda Portadora y Carrier Aggregation”,»,» Quito.
- [4] S. d. H. Torres, «Estudio de la estrategia de coordinación de interferencias entre celdas (ICIC) en LTE,» Barcelona, 2016.
- [5] L. Liu, R. Chen, S. Geirhofer, K. Sayana, Z. Shi y Y. Zhou, «Downlink MIMO in LTE-Advanced: SU-MIMO vs MU-MIMO,» IEEE Communications Magazine, 2012.
- [6] Z. E. CONTRERAS SANTILLÁN, «OPTIMIZACIÓN DE REUTILIZACIÓN DE FRECUENCIA EN AGRUPAMIENTOS DE CELDAS LTE MACRO,» Mexico, D.F, 2016.
- [7] F. Athley y M. N. Johansson, «Impact of Electrical and Mechanical Antenna Tilt on LTE Downlink System Performance,» *IEEE 71st Vehicular Technology Conference*, p. 5, 2010.
- [8] C. Granera García, G. Mendoza Baca y N. Valle Rojas, «Análisis de las limitaciones técnicas en el despliegue de la tecnología LTE en la ciudad de León-Nicaragua, en el periodo comprendido entre los meses de Mayo a Octubre del año 2016.,» León, 2016.

- [9] E. Dahlman, S. Parkvall y J. Skold, 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Oxford: Elsevier Ltd, 2014.
- [10] R. Agusti y F. Á. & otros, LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES, España, 2010.
- [11] J. Hoyos y A. Naula, «Análisis del desempeño de una red LTE basado en técnicas de múltiples antenas MIMO y agregación de segunda portadora, en un escenario con alta densidad de tráfico.,» Guayaquil, Ecuador, 2016.
- [12] J. Gómez y X. Romero, “Análisis del throughput en una red LTE-A con el modelo SPM calibrado y distintas estrategias del packet Scheduling”, Managua, 2018.
- [13] J. M. Garzón Gil y R. D. Camargo Martínez, «ESTUDIO DE COBERTURA DE LA RED DE LTE EN LA LOCALIDAD DE CHAPINERO BOGOTÁ DE LOS OPERADORES CLARO, MOVISTAR Y TIGO,» BOGOTÁ, 2015.
- [14] A. B. Atta, Inter-Cell Interference Mitigation in LTE-Advanced Heterogeneous Mobile Networks, Inglaterra, 2017.
- [15] V. B. García, Optimización de la cobertura y la capacidad en redes LTE mediante procesamiento de eventos complejos, Málaga, 2017.
- [16] G. Piero, «ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL USO DE TÉCNICAS DE MÚLTIPLES ANTENAS EN UNA RED MÓVIL LTE CON LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN ATOLL,» Barcelona, 2013.
- [17] Q. Li, G. Li, W. Lee, M.-i. Lee, D. Mazzarese, B. Clerckx y Z. Li, «MIMO Techniques in WiMAX and LTE: A Feature Overview,» IEEE Communications Magazine, 2010.
- [18] Z. J. Velez, «Mecanismos para el análisis de indicadores de red LTE,» Guayaquil, 2018.

- [19] Forsk, «Atoll: Technical Reference Guide,» Forsk, Francia, 2015.
- [20] H. A. T. VANEGAS, «METODOLOGÍAS DE DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE REDES 4G - LTE,» San Salvador, 2022.
- [21] P. R. J. Pozo, Diseño de cobertura de telecomunicaciones LTE para el sector de Guajala para la empresa constructora Daniel Ayala TRT S.A., Quito, 2017.
- [22] . J. C. Saenz Ravines y B. G. Barrantes Vera, “IDENTIFICACIÓN DE FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DE SERVICIO DE LA RED MÓVIL LTE EN LA CIUDAD DE OTUZCO- 2018, MEDIANTE UNA MEDICIÓN DRIVE-TEST”, Perú, 2019.
- [23] R. Agustí, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Perez-Romero y O. Salent, LTE: NUEVAS TENDENCIAS DE EN COMUNICACIONES MOVILES, Fundación Vodafone España, 2010.
- [24] E. Dahlman, S. Parkvall y J. Skold, 4G: LTE/LTE-Advanced, Waltham, 2014.
- [25] Infovista, «TEMS™ Pocket 22.0 Technical Product Description,» 2020. [En línea]. Available: <https://infocom.haradacorp.co.jp/wp/wp-content/uploads/2020/10/TEMS-Pocket-22.0-Technical-Product-Description.pdf>.
- [26] F. E. L. Villena, «Estudio para la recolección de parámetros técnicos a utilizarse en el control de redes LTE 4G en Ecuador,» Quito, 2017.
- [27] J. G. P. Cano y M. A. Góngora, «Propuesta de Manual para Planeación de Redes Móviles en Nicaragua Utilizando el software ATOLL,» Managua, 2012.
- [28] M. Sánchez, *INTRODUCCIÓN A PLANEACIÓN Y DISEÑO DE REDES MÓVILES*, Managua, 2020.
- [29] Forsk, *Atoll SPM (Standard Propagation Model) calibration guide*.

- [30] E. J. L. Díaz, Análisis de las Estrategias de Gestión del Espectro Radioeléctrico en un Sistema LTE con la herramienta Atoll, Barcelona, 2012.
- [31] 3GPP, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios (3GPP TR 36.942 version 8.1.0 Release 8).
- [32] Fork, User Manual for Radio Network, 2016.
- [33] O. G. Silva Gallardo y A. J. Olivos Piscocoya, Diseño y simulación de una red inalámbrica con tecnología LTE para el acceso móvil de banda ancha en la Nueva Ciudad de Olmos, Peru, 2016.
- [34] CÁMARA NICARAGUENSE DE INTERNET Y TELECOMUNICACIONES, «ESTADÍSTICAS CANITEL,» Managua, 2018.
- [35] R. I. Muños y K. Castillo, «Método de Calibración Standalone para el Modelo de Propagación SPM en un sistema WCDMA-850MHz,» Managua, Nicaragua, 2019.
- [36] J. Hoyos Zabala y A. Naula Zhongor, «"ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UNA RED LTE BASADO EN TÉCNICAS DE MÚLTIPLES ANTENAS MIMO Y DE AGREGACIÓN DE SEGUNDA PORTADORA, EN UN ESCENARIO CON ALTA DENSIDAD DE TRÁFICO",» Guayaquil, 2016.

Anexo

Anexo 1: Manual para el software de simulación Atoll

El propósito de este anexo es compartir un manual para la creación de una red LTE utilizando el software de simulación Atoll para aportar a estudiantes que realicen investigaciones documentales donde decidan utilizar este software. El manual que se presenta a continuación conlleva actividades que se desarrollaron para la realización de este trabajo monográfico.

1. Creación de un proyecto

Para crear un nuevo proyecto en Atoll debemos seleccionar una plantilla para la tecnología en la que se desarrollará el proyecto. En este caso se toma el ejemplo para la tecnología LTE.

1.1 Crear plantilla LTE: Ejecutar Atoll → File → New → From a Document Template → LTE

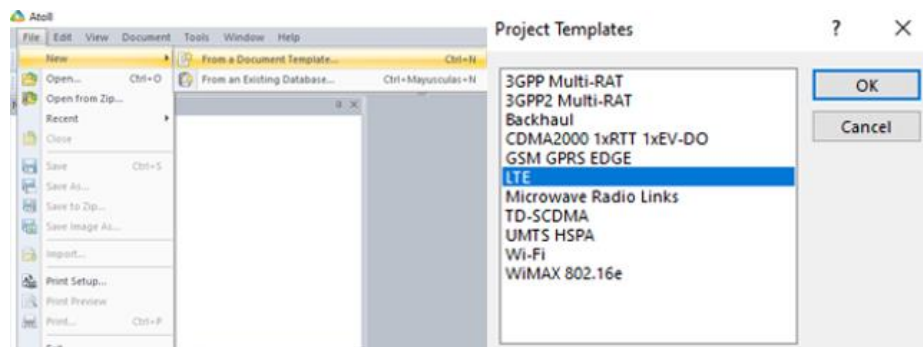


Figura 39. Plantilla LTE. Elaboración propia.

1.2 Seleccionar coordenadas: Documents → Properties → Projection (tres puntos) → Find in tab → Seleccionar WGS84 UTM Zones → Seleccionar UTM Zone 16N.

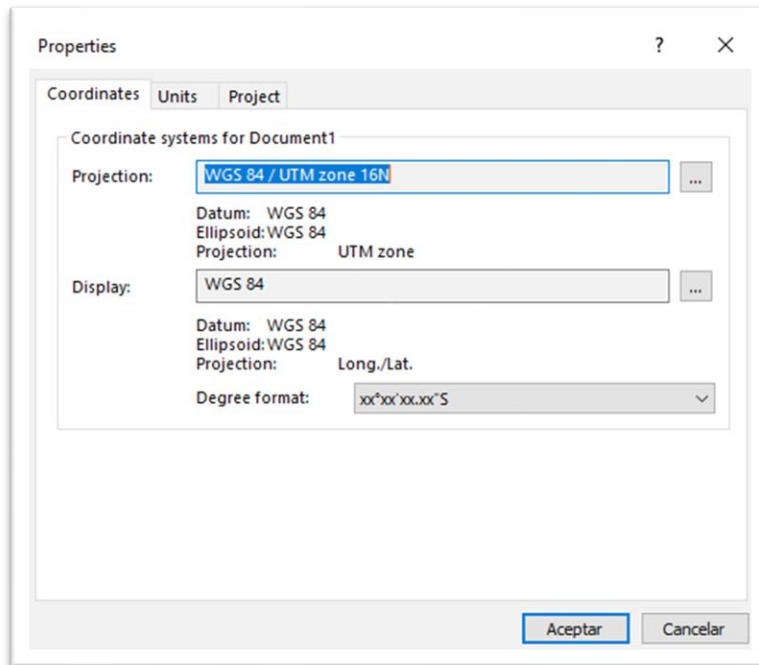


Figura 40. Configuración de coordenadas. Elaboración propia.

1.3 Cargar base de datos de terreno: En este paso se carga la información de Heights, Clutter y Vectors.

1.3.1 Cargar datos de Heights: File → Import → Localizar la carpeta MapNicaraguaAtoll (para este proyecto) → Map Data_30m → Heights → Height Completo → Index.

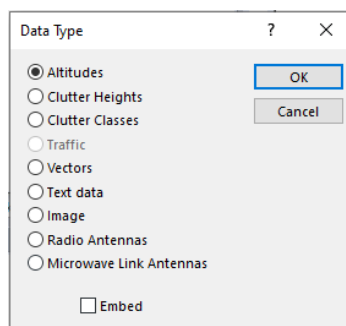


Figura 41. Importación de Heights. Elaboración propia.

1.3.2 Cargar Vectores: File → Import → Carpeta MapNicaraguaAtoll → Carpeta Map Data_30 → Carpeta Vector → Carpeta TAB_Nicaragua → Seleccionar todos los archivos extensión Tab → Import

1.3.3 **Cargar datos de Clutter:** File → Import → MapNicaraguaAtoll → Map Data_30m → Clutter → Clutter Completo → Index.

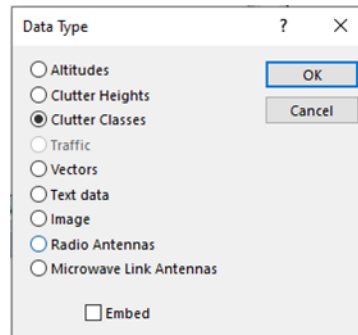


Figura 42. Importación de clutter. Elaboración propia.

1.3.4 **Editar colores de para el Clutter:** Seleccionar Tab Geo → Clic derecho en carpeta Clutter Classes → Properties. A continuación, se comparte un ejemplo para los colores de Clutter.

		Value	Legend	
1		0 - unclassified	0 - unclassified	☑
2		1 - open	1 - open	☑
3		2 - sea	2 - sea	☑
4		3 - inlandwater	3 - inlandwater	☑
5		4 - residential	4 - residential	☑
6		5 - meanurban	5 - meanurban	☑
7		6 - denseurban	6 - denseurban	☑
8		7 - buildings	7 - buildings	☑
9		8 - village	8 - village	☑
10		9 - industrial	9 - industrial	☑
11		10 - openinurban	10 - openinurban	☑
12		11 - forest	11 - forest	☑
13		12 - parks	12 - parks	☑
14		15 - agriculture	15 - agriculture	☑
15		26 - denseurbanhigh	26 - denseurbanhigh	☑
16		27 - blockbuildings	27 - blockbuildings	☑
17		28 - denseblockbuild	28 - denseblockbuild	☑
18		29 - rural	29 - rural	☑
19		30 - residhigh	30 - residhigh	☑
20		31 - dbbhigh	31 - dbbhigh	☑
21		32 - bbhigh	32 - bbhigh	☑
22		33 - denseurbanlow	33 - denseurbanlow	☑
23		34 - semiopenarea	34 - semiopenarea	☑
24		35 - openwetarea	35 - openwetarea	☑
25		36 - forestspare	36 - forestspare	☑

Figura 43. Colores de clutter. Elaboración propia.

1.4 **Importar patrones de radiación:** Seleccionar Tab Parameters → Seleccionar Radio Network Equipment → Antenna → Clic derecho y presionar Open Table → Clic en símbolo de Importar → Seleccionar archivo TXT de patrones de antena → Importar

1.5 **Crear Feeders:** Seleccionar Tab Parameters → Seleccionar Radio Network Equipment → Feeders

1.6 Equipo Transmisor: Seleccionar Tab Parameters → Seleccionar Radio Network Equipment → Transmitter Equipment → Editar transmisor con Noise floor.

1.7 Importar información de sitios: Si tenemos información de sitios en un archivo CSV o TXT podemos importarlo directamente en Atoll o bien crearlo desde la tabla que proporciona Atoll. Seguir estos pasos para importar archivo: Seleccionar Tab Network → Clic derecho en Sites → Clic en Open Table → Ubicar símbolo de importación → Buscar y Seleccionar archivo → Import.

1.8 Importar información de transmisores: Una vez se crean los sitios podemos importar los transmisores o bien crearlos desde la tabla de Transmitters. En este caso se importa la información de transmitters. Seleccionar Tab Network → Clic derecho en Transmitters → Clic en Open Table → Buscar y seleccionar archivo → Import.

Nota: No es necesario que en los archivos TXT y CSV se tenga toda la información que Atoll tiene en su tabla. Esto se puede editar más adelante. En caso de tener columnas en el CSV que vamos a importar y no deseamos que Atoll las considere, podemos dar clic en esta columna (en el proceso de importación) y seleccionar la opción de Ignore. Usualmente si recibimos un error en este proceso, es debido a la información que Atoll aún no conoce, por ejemplo, si en la columna de Main Propagation Model colocamos un nombre de modelo que Atoll no tiene en su plantilla nos dará un error.

1.9 Importar celdas: En la tabla de celdas es donde podremos observar configuraciones para el transmisor como umbral RSRP, Frame configuration, PCI del transmisor, entre otros. Este paso puede hacerse manual o en caso de tener ya la información en un TXT o CSV podemos seguir los pasos a continuación: Seleccionar Tab Network → Clic derecho en Transmitters → Clic en Celda → Clic en importar → Buscar y seleccionar archivo → Import.

- 1.10 **Asignar colores a los transmisores:** Seleccionar Tab Network → Clic derecho en Transmitters → Clic en Properties → Clic en Display → Clic en Display Type → Seleccionar Automatic → Clic en aplicar y luego Aceptar.

2. CALIBRACION DE MODELO DE PROPAGACION ESTANDAR

Para tener mejores predicciones en la red se realiza la calibración del modelo de estimación de perdidas. Para este proyecto se tomó la calibración del modelo SPM. A continuación, se comparten los pasos del proceso una vez obtenida información de Drive Test.

Para la calibración se utiliza el módulo CW Measurement en el cual se importan las mediciones de Drive test para cada sector considerando el PCI del mismo. Antes de iniciar el proceso se recomienda crear un archivo CSV o TXT con las columnas Longitud, Latitud, MN01_A. Donde MN01_A, es el sector y la columna que tendrá las mediciones RSRP, mientras las otras dos columnas contienen la ubicación geográfica de cada muestra RSRP.

- 2.1 Debemos desactivar todos los transmisores para centrarnos primeramente en un transmisor. Seleccionar Tab Network → Clic derecho en Transmitters → Clic en Deactivate Transmitters. Habilitar un solo transmisor, Clic derecho transmitter MN01(A) → Active Transmitter.
- 2.2 **Importar archivo con medición RSRP:** Seleccionar Tab Network → Clic derecho en CW Measurement → Clic en Import → Buscar y seleccionar archivo con medición RSRP para este sector → Desde la ventana emergente ubicar 1st Measurement row y cambiar valor de 1 a 2 → Clic en Setup → Seleccionar en X, Y y Measurement → Clic en OK → Ir a tab General → en Name seleccionar el sector correspondiente. Realizar el mismo proceso para los otros sectores del sitio.
- 2.3 **Asignar colores a muestras CW:** Clic derecho en CW Measurement → Clic en Properties. Se recomienda crear intervalos que coincidan con los intervalos de la aplicación utilizada en el Drive test. Una vez se crea podemos exportar esa leyenda desde Actions → Display Configuration.

2.4 Utilizar Filter Assistant: Desplegar CW Measurement → Desplegar la primera carpeta → En el resultado dar Clic derecho → Clic en Filter Assistant. Desde la ventana emergente podemos utilizar los datos como se muestra en la siguiente figura.

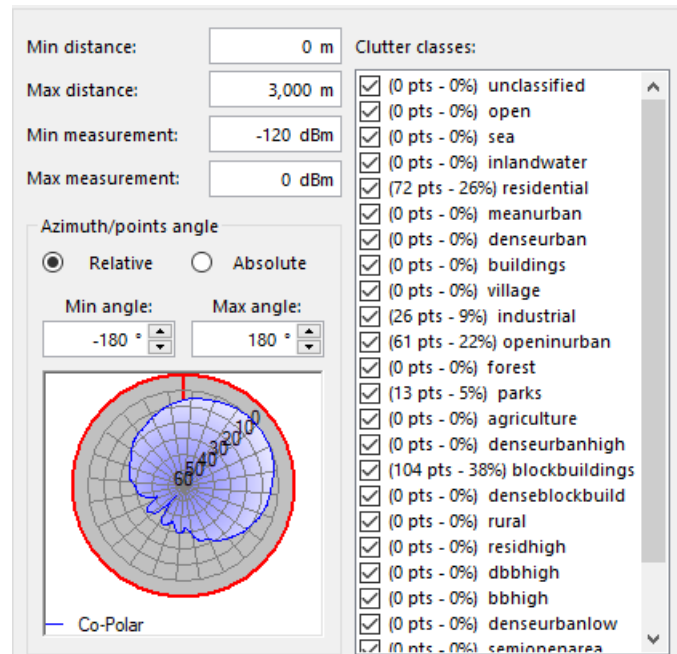


Figura 44. Uso de Filter Assistant. Elaboración propia.

Debemos repetir estos pasos con los demás sectores.

Antes de continuar el proceso de calibración debemos asignar el modelo de propagación a los transmisores. Sin embargo, antes de este proceso se recomienda duplicar el modelo de propagación, en este caso SPM. Para esto debemos ir al Tab de Parameters → Desplegar la carpeta Propagation Models → Ubicar el modelo Standard Propagation Model → Clic derecho Duplicate. (El nombre se puede cambiar).

Una vez hemos duplicado el modelo podemos asignarlo a los transmisores.

2.5 Asignación de modelo de propagación: Seleccionar Tab Network → Clic derecho en Transmitters → Clic en Open Table → Ubicar columna Main Propagation Model → Asignar el modelo duplicado

2.6 Asignar modelo en carpeta Transmitters: Clic derecho en Transmitters → Clic en Properties → Clic en Propagation → Asignar el modelo duplicado → Aplicar y Aceptar → Activar todos los transmisores → Clic derecho en Transmitters → Clic en Calculations → Clic en Calculate Path Loss Matrices → Desactivar todos los transmisores menos MN01_A ya que lo tomaremos para la calibración.

2.7 Crear predicción: Primero debemos asignar el modelo calibrado al folder Predictions, Clic derecho en Predictions → Clic en Properties → Seleccionar el modelo SPM sin calibrar → Clic derecho en Transmitter (teniendo todos los Transmisores activos) → Clic Calculations → Clic en Create a New Prediction → Clic en Coverage by signal level Crear el intervalo de niveles RSRP que coincida con el drive test desde Display → En General establecer el nivel mínimo en dBm, ejemplo 125 dBm.

Una vez realizados estos pasos debemos desactivar todos los transmisores y regresar a la carpeta de CW Measurement para calcular el Error (P-M) dB para cada muestra que hemos importado.

2.8 Calcular Error (P-M) (dB): Desplegar CW Measurement → Desplegar carpeta de medición → Clic derecho en el siguiente campo → Clic en Calculations → Calculate Signal Level.

2.9 Calibracion para un sector: Seleccionar Tab Properties → Clic en Propagation Models → Clic derecho en modelo previamente duplicado de SPM → Clic en Calibration → En ventana emergente seleccionar la carpeta creada para el transmisor → Siguiente.

Se puede realizar una nueva predicción con el sector calibrado para comparar los resultados al tener un modelo de estimación sin calibrar y calibrado.

2.10 Crear predicción con modelo calibrado: Primero debemos asignar el modelo calibrado al folder Predictions, Clic derecho en Predictions → Clic en Properties → Seleccionar el modelo calibrado. Desde Transmitters ubicar el transmisor del sitio MN1_A → Clic derecho → Clic en Calculations → Clic en Create a New Prediction → Clic en predicción Coverage by signal Level.

Los pasos antes mencionados pueden realizarse con la mayoría de transmisores de preferencia. Una vez tenemos la calibración para algunos transmisores podemos hacer la calibración general donde en lugar de seleccionar la carpeta de un solo transmisor desde la ventana de calibración, seleccionamos todos los transmisores.

3. CREACION DE MAPAS DE TRAFICO.

Para la creación de mapas de tráfico primer debemos considerar que la carga de tráfico en Atoll puede realizarse de forma manual desde la tabla de celdas o bien por simulaciones Monte Carlo.

Para este proyecto se utilizó simulaciones de Monte Carlo donde debemos centrarnos en el Tab de Parameters → Traffic Parameters. Desde en esta carpeta observaremos las carpetas Services, Mobility Types, Terminals, User Profiles y Environment.

3.1 Services: Se definen los servicios que serán utilizados durante la simulación.

3.2 Mobility Types: Se crean diferentes movilidades que tendrán los usuarios.

Una movilidad Fixed representa a usuarios estáticos en un solo punto, otra movilidad como Pedestrian son usuarios que se desplazan a 3 Km/h. Podemos tener diferentes movilidades durante la simulación.

3.3 Terminals: Se configuran los terminales o equipos de usuarios que tendrán los usuarios, ejemplo equipos que soportan MIMO.

3.4 User profiles: Podemos crear perfiles de usuario donde se selecciona que tipo de terminal puede tener un usuario respecto al perfil.

3.5 Environment: En esta carpeta se define que tipo de entorno será utilizado para la simulación, puede ser áreas rurales, urbanas, suburbanas u otras. En este apartado debemos seleccionar la cantidad de usuarios por Km².

Una vez hemos configurado la información que Atoll tomará en las simulaciones debemos crear el tipo de entorno, para esto creamos un mapa de tráfico desde el tab de Geo.

3.6 Crear mapa de tráfico: Ir a Tab Geo → Clic derecho en Traffic Map → Clic en New Map → Seleccionar User Profile environment como se muestra en la siguiente figura → Seleccionar el tipo de entorno.

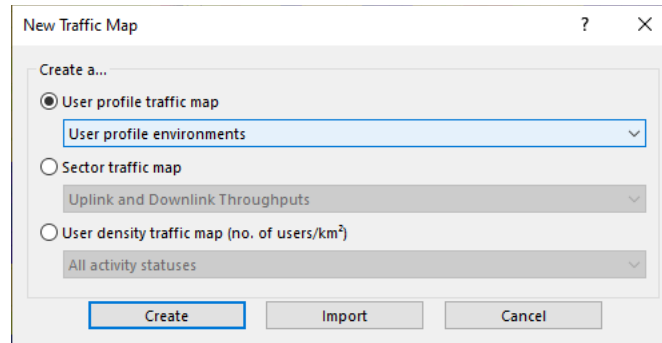


Figura 45. Creación de mapa de tráfico. Elaboración propia.

3.7 Crear simulación: Ir a Tab Network → Clic derecho en Simulation → Clic en New → Desde la pestaña General podemos establecer la mayor carga de tráfico. En número de simulación podemos cambiarlo, por ejemplo 10 → Ir a pestaña Traffic → Seleccionar el mapa de tráfico previamente creado → Ir a pestaña Advanced y editar la carga de tráfico para esta simulación. Si la Max DL traffic load es 100%, el parámetro DL traffic load puede ser igual o menor. Esto mismo puede ser para enlace UL → Clic en aceptar y calcular. Para verificar los resultados Clic derecho en el resultado de simulación y seleccionar Average Simulation. Si se realiza una optimización podemos utilizar esta misma simulación primero duplicándola, clic derecho en resultado de simulación → Duplicate. Una vez se realice cualquier tipo de optimización podemos utilizar esta misma simulación y utilizar la opción de Replay.