



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**GEORREFERENCIACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORA DE COBERTURA CELULAR PARA
LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Jorge Estuardo López Joaquín
Asesorado por el Ing. Iván René Morales Argueta

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GEORREFERENCIACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORA DE COBERTURA
CELULAR PARA LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JORGE ESTUARDO LÓPEZ JOAQUÍN

ASESORADO POR EL ING. IVÁN RENÉ MORALES ARGUETA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Walter Giovanni Álvarez Marroquín
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
EXAMINADOR	Ing. Helmunt Federico Chicol Cabrera
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

GEORREFERENCIACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORA DE COBERTURA CELULAR PARA LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica, con fecha 17 de mayo de 2017.



Jorge Estuardo López Joaquín

Guatemala 5 de julio de 2018

Ingeniero
Julio Cesar Solares Peñate
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Ingeniero Solares.

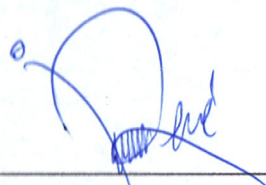
Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titular. **"Georreferenciación y Propuesta de Mejora de Cobertura Celular para la Universidad de San Carlos de Guatemala"**, del señor Jorge Estuardo López Joaquín, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente.

F.



Ing. Iván Rene Morales Argueta
Colegiado 12,489
Asesor

Iván René Morales Argueta
Ingeniero Electrónico
Colegiado 12489



REF. EIME 62. 2018.
20 DE AGOSTO 2018.

FACULTAD DE INGENIERIA

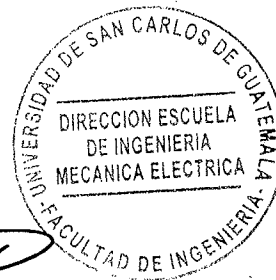
Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

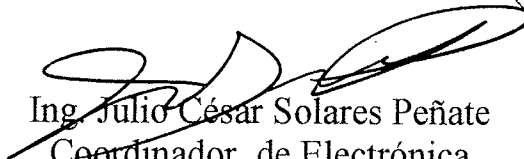
Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**GEORREFERENCIACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORA DE
COBERTURA CELULAR PARA LA UNIVERSIDAD DE SAN
CARLOS DE GUATEMALA,** del estudiante **JORGE
ESTUARDO LÓPEZ JOAQUÍN,** que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS




Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica



REF. EIME 62.2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **JORGE ESTUARDO LÓPEZ JOAQUÍN**, titulado: **GEORREFERENCIACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORA DE COBERTURA CELULAR PARA LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Fernando Andriano González



GUATEMALA, 19 DE SEPTIEMBRE 2018.

Universidad de San Carlos
de Guatemala

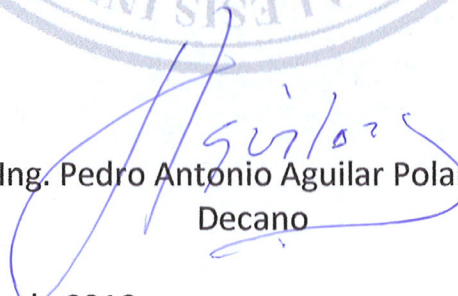


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 468.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al Trabajo de Graduación titulado: **"GEORREFERENCIACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORA DE COBERTURA CELULAR PARA LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA"**, presentado por el estudiante universitario: **Jorge Estuardo López Joaquín** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala noviembre de 2018.

/echm



ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres	Mario López y Tania Joaquín. Por su incondicional apoyo a lo largo de la carrera y su vivo ejemplo de determinación y trabajo.
Mis abuelos	Petrona Hernández, Jorge Joaquín y Rosa Hernández. Por su cálido ejemplo y enseñanzas de vida que llevo conmigo en mi hacer diario.
Mis hermanos	Mario y Arlyn. Por ser mi constante motivación en mi proceso de superación y un permanente apoyo incondicional.
Mis tías y tíos	Por todo su apoyo a lo largo de los años y sus enseñanzas que guardo con mucho cariño.
Anayansi Ramírez	Por ser mi fuente de alegría e inspiración y por acompañarme a lo largo de los años brindándome todo su apoyo y cariño.
Mis amigos	Por todo su apoyo y compañía en los buenos y malos momentos.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por haber sido la casa de estudios que me albergó a lo largo de mi proceso de formación.
Departamento de Física	Por haberme brindado una oportunidad laboral y la oportunidad de relacionarme con personas tan especiales.
Mi grupo de trabajo	Conformado por Werner Florián y Fernando Monzón. Por haber compartido conmigo el camino de aprendizaje a lo largo de la carrera.
Mis profesores	En especial a mi asesor, Iván Morales, por todas sus enseñanzas y dedicación, que forjaron y moldearon el conocimiento adquirido.
Familia Pérez Müller	Por ser una segunda familia para mí y por su apoyo en los últimos años.

	1.2.1.3.	Servicios suplementarios.....	7
1.2.2.		GPRS (General Packet Radio Service).....	10
	1.2.2.1.	Arquitectura GPRS.....	11
	1.2.2.2.	Servicios GPRS.....	13
	1.2.2.3.	Terminales móviles GPRS	13
1.2.1.		Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE) ...	13
1.3.		Redes móviles de tercera generación	14
1.3.1.		Universal Mobile Telecommunications System (UMTS).....	15
	1.3.1.1.	Arquitectura de sistemas UMTS.....	15
		1.3.1.1.1. Red de acceso de radio terrestre (UTRAN)	16
		1.3.1.1.2. Red Central (<i>core network</i>).....	17
		1.3.1.1.3. Equipo de usuario (terminales móviles UMTS).....	18
	1.3.1.2.	Servicios UMTS.....	18
1.3.2.		High-Speed Packet Access (HSPA).....	19
	1.3.2.1.	HSDPA (High Speed Down-Link Packet data Access).....	19
	1.3.2.2.	HSUPA (High Speed Up-Link Packet Data Access).....	19
1.3.3.		Evolved HSPA o HSPA+	20
1.4.		Redes móviles de cuarta generación	21
1.4.1.		Long Term Evolution (LTE)	21
	1.4.1.1.	Arquitectura LTE	22
		1.4.1.1.1. Evolved UTRAN	22

	1.4.1.1.2.	Evolved Packet Core (EPC).....	23
1.5.		Telefonía celular en Guatemala.....	24
	1.5.1.	Tarifas y precios de operadores de red local	30
2.		PLANIFICACIÓN DE REDES CELULARES Y PARÁMETROS DE CALIDAD DE COBERTURA	35
2.1.		Planificación de cobertura	35
	2.1.1.	Consideraciones de radioenlace.....	36
		2.1.1.1. Tipos de antena	36
		2.1.1.2. Tipos de estructura para antenas	39
	2.1.2.	Presupuesto de enlace (<i>link budget</i>)	42
		2.1.2.1. Presupuesto de enlace para redes LTE	43
	2.1.3.	Continuidad en cobertura	44
2.2.		Planificación de capacidad	45
	2.2.1.	Modelo Erlang.....	45
		2.2.1.1. Modelo Erlang B	46
		2.2.1.2. Modelo Erlang B extendido.....	46
	2.2.2.	Dimensionamiento de un sistema celular	47
2.3.		Planificación de frecuencia	49
2.4.		Parámetros de calidad en una red telefónica	49
	2.4.1.	Calidad de servicio (<i>quality of service</i>)	49
	2.4.2.	Parámetros de señales en redes GSM, UMTS y LTE	50
	2.4.3.	Accesibilidad de una red de voz/datos	51
	2.4.4.	Accesibilidad e integridad de los servicios.....	52

3.	DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE MEJORA DE COBERTURA Y TÉCNICA DE RECOPIACIÓN DE DATOS DE CAMPO	55
3.1.	Sectorización.....	55
3.2.	División celular (<i>cell splitting</i>)	56
3.2.1.	Clasificación de celdas por su tamaño	56
3.3.	Ajustes en parámetros de antenas.....	58
3.3.1.	Patrón de radiación de una antena	58
3.3.2.	Modificación del <i>tilt</i> de la antena	59
3.3.2.1.	Cálculo del <i>tilt</i> de una antena	60
3.3.2.2.	Modificación mecánica del <i>tilt</i>	61
3.3.2.3.	Modificación eléctrica del <i>tilt</i>	61
3.3.2.4.	Principales diferencias entre la modificación mecánica y la modificación eléctrica del <i>tilt</i>	61
3.3.3.	Modificación del <i>azimuth</i> de la antena	63
3.3.4.	Cambio en la altura de la antena.....	64
3.4.	Recopilación de datos de campo por medio de <i>drive test</i>	64
3.4.1.	Elementos principales de un <i>drive test</i>	64
3.4.2.	Tipos de <i>drive test</i>	65
3.4.2.1.	Análisis de rendimiento	65
3.4.2.2.	Benchmarking	66
3.4.2.3.	Optimización y solución de problemas.....	66
4.	EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SERVICIO EN EL <i>CAMPUS</i> UNIVERSITARIO	67
4.1.	Hardware.....	67
4.1.1.	Terminal empleado.....	67
4.2.	Software	68

4.2.1.	G-Net Track Lite v4.9.....	68
4.2.1.1.	Recopilación de datos en G-Net Track Lite v4.9	73
4.2.2.	nPerf	75
4.2.2.1.	Prueba de <i>bitrate</i>	76
4.3.	Mapas de cobertura.....	77
4.3.1.	Mapas de cobertura para tecnología de segunda generación	78
4.3.1.	Mapas de cobertura para tecnología de tercera generación	81
4.3.1.	Mapas de cobertura para tecnología de cuarta generación.....	85
4.4.	Mapas de velocidad de carga y descarga de datos.....	94
4.4.1.	Mapas de velocidades de carga y descarga para la red de Claro	95
4.4.2.	Mapas de velocidades de carga y descarga para la red de Movistar	98
4.4.3.	Mapas de velocidades de carga y descarga para la red de Tigo.....	103
4.4.4.	Comparación de resultados de velocidades de carga y descarga	108
4.4.5.	Diagnóstico final de la red de telefonía celular	112
5.	ELABORACIÓN DE PROPUESTA DE MEJORA DE COBERTURA ...	115
5.1.	Consideraciones de transmisión.....	115
5.2.	Software de simulación Radio Mobile.....	119
5.3.	Adición de sitio para mejora de cobertura en los alrededores de las facultades de Humanidades y Odontología	121

5.3.1.	Parámetros de simulación	121
5.3.1.1.	Cálculo del <i>downtilt</i> de la antena.....	122
5.3.1.2.	Fotografías del lugar propuesto para la adición del sitio	122
5.3.2.	Resultados de la simulación.....	125
5.4.	Adición de sitio para mejora de cobertura en los alrededores de las facultades de Ingeniería y Arquitectura....	129
5.4.1.	Parámetros de simulación	129
5.4.1.1.	Cálculo del <i>downtilt</i> de la antena.....	130
5.4.1.2.	Fotografías del lugar propuesto para la adición del sitio	130
5.4.2.	Resultados de la simulación.....	131
5.5.	Adición de canales por expansión de usufructo de frecuencia de Telecomunicaciones de Guatemala, S. A.	134
CONCLUSIONES.....		137
RECOMENDACIONES		139
BIBLIOGRAFÍA.....		141

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Arquitectura de la red GSM.....	3
2.	BSS	4
3.	Arquitectura GPRS.....	12
4.	Arquitectura UMTS.....	16
5.	Arquitectura LTE	22
6.	E-UTRAN	23
7.	Proporción de usuarios en operación por compañía	27
8.	Proporción de líneas de crédito (postpago y prepago).....	27
9.	Proporción del tráfico nacional generado por cada operador.....	29
10.	Comportamiento histórico del crecimiento de la telefonía móvil en Guatemala.....	30
11.	Precios de planes móviles postpago de Movistar	31
12.	Tarifas LDI prepago de Movistar	31
13.	Tarifas de planes postpago con contrato de Tigo	32
14.	Tarifas de planes postpago con contrato de Tigo	32
15.	Tarifas de planes postpago de Claro 1/2.....	33
16.	Tarifas de planes postpago de Claro 2/2.....	33
17.	Antena tipo dipolo	37
18.	Antena tipo yagi	38
19.	Antena parabólica	39
20.	Torre arriestrada	40
21.	Torre autosoportada.....	40
22.	Torre tipo monoposte	41

23.	Poste tipo monoposte ecológico	42
24.	Sectorización de tres sectores	56
25.	Tipos de celdas.....	57
26.	Patrón de radiación de una antena	59
27.	<i>Tilt</i> de una antena	60
28.	Patrón de radiación con alteración del <i>tilt</i>	63
29.	Pestaña principal (<i>Cell</i>).....	69
30.	Pestaña de información de celdas vecinas	70
31.	Pestaña de mapa.....	71
32.	Pestaña de información de la conexión	72
33.	Pestaña de <i>drive test</i>	73
34.	Menú de G-Net Track Lite v4.9	74
35.	Pestaña principal de nPerf.....	75
36.	Resultados de una prueba de <i>bitrate</i> en nPerf	77
37.	Mapa de cobertura para Claro	79
38.	Mapa de cobertura para Tigo.....	79
39.	Mapa de cobertura para Movistar	80
40.	Mapa de cobertura para Claro	82
41.	Mapa de cobertura para Tigo.....	82
42.	Mapa de cobertura para Movistar	83
43.	Mapa de cobertura para Claro	86
44.	Mapa de cobertura para Tigo.....	86
45.	Mapa de cobertura para Movistar	87
46.	<i>Handoff</i> en cobertura para Claro 4G.....	89
47.	Cobertura 4G con <i>handoff</i> a 3G (Claro).....	90
48.	<i>Handoff</i> en cobertura para Movistar 4G.....	91
49.	Cobertura 4G con <i>handoff</i> a 3G (Movistar).....	92
50.	Velocidad de descarga máxima.....	95
51.	Velocidad de carga máxima.....	96

52.	Velocidad de descarga máxima	98
53.	Velocidad de descarga promedio.....	99
54.	Velocidad de carga máxima	101
55.	Velocidad de carga promedio.....	102
56.	Velocidad de descarga máxima	104
57.	Velocidad de descarga promedio.....	105
58.	Velocidad de carga máxima	106
59.	Velocidad de carga promedio.....	107
60.	Mapas de velocidad de descarga con criterios unificados	109
61.	Mapas de velocidad de carga con criterios unificados	110
62.	Patrón de radiación horizontal de la antena propuesta	116
63.	Patrón de radiación vertical de la antena propuesta	117
64.	Dimensiones de la antena Kathrein 742215.....	118
65.	Mecanismo de ajuste del <i>DownTilt</i>	119
66.	Software Radio Mobile	120
67.	Entrada al complejo deportivo (Opción 1)	123
68.	Lugar de instalación del sitio 1 (opción 1)	124
69.	Lugar de instalación del sitio 1 (opción 2)	125
70.	Codificación de colores en mapa de cobertura simulada.....	126
71.	Cobertura de sitio 1 con <i>road maps</i>	127
72.	Cobertura de sitio 1 con fotos aéreas.....	128
73.	Lugar de instalación del sitio 2	131
74.	Cobertura de sitio 2 con <i>road maps</i>	132
75.	Cobertura de sitio 2 con fotos aéreas.....	133
76.	Concurso público para usufructo de frecuencias	135

TABLAS

I.	Parámetros de operación de empresas de telefonía en Guatemala	25
----	--	----

II.	Líneas en operación de telefonía móvil	26
III.	Tráfico nacional generado por cada operador	28
IV.	Total de tráfico nacional generado por cada operador.....	28
V.	Valores típicos para estimación del presupuesto de enlace en redes <i>LTE</i>	43
VI.	Codificación de colores para mapas de cobertura en 2G	78
VII.	Codificación de colores para mapas de cobertura en 3G	81
VIII.	Codificación de colores para mapas de cobertura en 3G	85
IX.	Codificación de colores para velocidad de descarga máxima	96
X.	Codificación de colores para velocidad de carga máxima	96
XI.	Codificación de colores para velocidad de descarga máxima	99
XII.	Codificación de colores para velocidad de descarga promedio	99
XIII.	Codificación de colores para velocidad de carga máxima	101
XIV.	Codificación de colores para velocidad de carga promedio.....	102
XV.	Codificación de colores para velocidad de descarga máxima	104
XVI.	Codificación de colores para velocidad de descarga promedio	105
XVII.	Codificación de colores para velocidad de carga máxima	106
XVIII.	Codificación de colores para velocidad de carga promedio.....	107
XIX.	Tabla comparativa de velocidades de carga y descarga	108
XX.	Codificación de colores para mapas de velocidad de descarga con criterios unificados	109
XXI.	Codificación de colores para mapas de velocidad de carga con criterios unificados	110
XXII.	Resumen de especificaciones técnicas de la antena propuesta.....	116
XXIII.	Parámetros de simulación del primer sitio	121
XXIV.	Parámetros para el cálculo del <i>downtilt</i>	122
XXV.	Parámetros de simulación del primer sitio	129
XXVI.	Parámetros para el cálculo del <i>downtilt</i>	130

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
dB	Decibel o decibelio
dBm	Decibelio-milivatio
dB_i	Decibelio isotrópico
Hz	Hertz
Kbps	Kilobits por segundo
km	Kilómetro
Mbps	Megabits por segundo
MHz	Megahertz
m	Metro
μV	Microvoltio
Ω	Ohmio
W	Vatio
V	Voltio

GLOSARIO

Ancho de banda	Intervalo de frecuencias utilizables para la transmisión de señales.
Bit	Unidad básica de numeración en un sistema binario.
<i>Bitrate</i>	Tasa de transferencia de bits.
Celda	Sistema radioeléctrico de transmisión que comprende un área determinada.
Decibel	Unidad que expresa la relación entre dos valores en escala logarítmica.
Frecuencia	Magnitud que describe el número de ciclos repetidos por unidad de tiempo en elementos periódicos.
Hardware	Conjunto de elementos físicos que componen un sistema.
QoS	Concepto utilizado para medir el rendimiento de una red desde la perspectiva de usuario.
<i>Roaming</i>	Concepto referido a la capacidad de transferir dispositivos a redes secundarias sin necesidad de generar nueva autenticación.

SIM	Tarjeta electrónica utilizada para la autenticación de un dispositivo móvil en la red telefónica.
Software	Aplicación informática desarrollada para ejecutar tareas específicas.
Streaming	Transmisión de tramas de datos en tiempo real, utilizada para la difusión de audio y vídeo.
UHF	Banda del espectro electromagnético que ocupa las frecuencias de 300 a 3 000 MHz.
VHF	Banda del espectro electromagnético que ocupa las frecuencias de 30 a 300 MHz.
2G	Siglas utilizadas para referirse a la segunda generación de telefonía móvil.
3G	Siglas utilizadas para referirse a la tercera generación de telefonía móvil.
4G	Siglas utilizadas para referirse a la cuarta generación de telefonía móvil.

RESUMEN

Se elaboró una propuesta para mejorar el servicio brindado por los operadores móviles en relación a cobertura y tasas efectivas de transferencia en canales de subida y bajada, a lo largo del *campus* universitario de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

En el primer capítulo se desarrollan los fundamentos teórico-prácticos de redes móviles de segunda, tercera y cuarta generación, comprendiendo los estándares GSM, UMTS y LTE. Se detalla la arquitectura de las redes y los servicios ofrecidos en conjunto con las tecnologías desarrolladas en cada generación. Además, se describe brevemente al mercado de telefonía móvil en Guatemala y los operadores líderes que operan en el área metropolitana.

El segundo capítulo describe los aspectos relacionados con la planificación de redes de telefonía móvil y los principales parámetros de calidad asociados al servicio de redes desplegadas en la actualidad. Se detallan parámetros prácticos y teóricos en tablas y se desarrollan ecuaciones que en conjunto se utilizan para dimensionar una red de telefonía móvil.

El tercer capítulo desarrolla los métodos de mejora aplicables a redes celulares previamente establecidas, al igual que el método de recopilación de datos de campo utilizado para el análisis de la calidad de servicio de la red que sirve a la región delimitada para el estudio.

El cuarto capítulo describe a detalle la evaluación realizada a la calidad del servicio brindado por los operadores de telefonía móvil en el *campus*

universitario y las herramientas de software implicadas en la recopilación y análisis de datos. Se muestran figuras que describen el estado actual de la red y se desarrollan los problemas encontrados con la cobertura y las tasas de transferencia efectivas.

En el quinto capítulo se desarrolla la propuesta de mejora de cobertura con relación a la adición de sitios que sirvan a los sectores donde se compromete la calidad de servicio por la incapacidad de interactuar con la red debido a bajos niveles de potencia recibida. Se muestran los resultados de simulaciones hechas a través de software que validan la propuesta e ilustran la cobertura producida por los sitios adicionales.

OBJETIVOS

General

Formular una propuesta de mejora para la cobertura celular en el *campus* central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Específicos

1. Determinar las áreas del *campus* en las que la cobertura no sea óptima para garantizar la calidad del servicio.
2. Realizar una comparación entre el servicio ofrecido por cada una de las compañías telefónicas actuales.
3. Evaluar la calidad de llamada y la velocidad de carga y descarga de archivos ofrecida a lo largo del *campus*.
4. Determinar el tipo de tecnología prevaleciente a lo largo del *campus* universitario.
5. Evaluar la continuidad del servicio a lo largo del *campus* universitario.

INTRODUCCIÓN

Durante la última década, el crecimiento en la telefonía móvil en Guatemala ha sido una constante que actualmente ha llevado al número de terminales a sobrepasar los 19 millones. Este crecimiento va de la mano con el desarrollo tecnológico que permite la constante implementación de nuevos servicios móviles que han hecho que la telefonía evolucione, de un sistema netamente de transmisión de voz, a uno de transmisión de datos que comprende comunicación, entretenimiento, interconexión, seguridad, entre otros servicios.

Actualmente, a partir del despliegue de las redes con tecnologías de tercera y cuarta generación, existe una gran cantidad de servicios y procesos que requieren conectividad ininterrumpida con la red (para entrega de notificaciones, descarga de paquetes, monitoreo) y/o altas tasas de transferencia. Por lo tanto, tomando en cuenta la importancia de la calidad del servicio suministrado, se realizó una evaluación de la cobertura y las tasas de transferencia ofrecidas por los proveedores de servicio en las redes desplegadas a lo largo de las instalaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en donde se concentra una alta densidad poblacional de usuarios de telefonía móvil.

Adicionalmente, se realizó una propuesta de adición de sitios como medida correctiva, en función de los datos obtenidos de la evaluación y los sectores determinados sin cobertura por señales débiles recibidas por las terminales móviles.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICO-PRÁCTICOS DE LAS REDES CELULARES

1.1. Conceptos preliminares de redes móviles

Una red celular es un conjunto de celdas radioeléctricas establecidas para brindar cobertura a un área determinada. Estas celdas se distribuyen normalmente para cubrir áreas hexagonales para facilitar la continuidad de la cobertura y cada una cuenta con una estación base, para dirigir las comunicaciones en forma de ondas de radio desde y hasta las terminales móviles utilizadas por los usuarios.

Cada estación base cuenta con un transceptor y una unidad de control. A cada celda se le asigna una banda de frecuencias que debe ser diferente a la de las celdas adyacentes para evitar la diafonía. No obstante, cada celda utiliza múltiples transmisores de baja potencia y corto alcance que permiten la reutilización de frecuencias en celdas cercanas.

La cobertura varía por el perfil topográfico del terreno, construcciones que produzcan interferencia y limitaciones en la ubicación de las antenas; además la frecuencia utilizada en cada celda determina la capacidad de las ondas radioeléctricas de atravesar obstáculos, lo que implica que para áreas urbanas muy pobladas y áreas rurales poco pobladas puede elegirse distintas frecuencias que se adecuen a los posibles obstáculos en el medio.

1.2. Tecnología móvil de segunda generación

La tecnología móvil de segunda generación (2G), fue desarrollada como respuesta a las deficiencias de las redes de primera generación generadas por el uso masivo del sistema de comunicación telefónico. Las redes 2G marcan el cambio de sistemas analógicos a digitales que poseen una mayor efectividad, mayor inmunidad a interferencia y además presentan una reducción de costos en los dispositivos dispuestos para transmisión y recepción. Además, esta generación permitió la integración de algunos servicios como los mensajes de texto (SMS). La red 2G comprende varios protocolos desarrollados por diferentes empresas de telecomunicaciones que son incompatibles entre sí, los cuales abarcan los protocolos GSM, IS-54, JDC e IS-95.

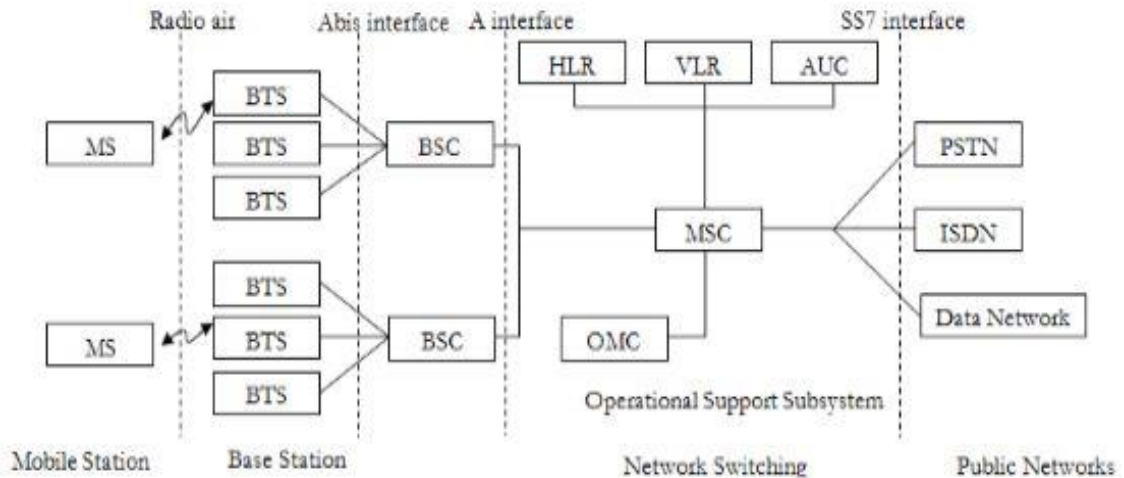
1.2.1. Estándar GSM

El sistema global para comunicaciones móviles, por sus siglas en inglés GSM (Global System for Mobile Communications), es el estándar europeo de la segunda generación de redes móviles.

1.2.1.1. Arquitectura de redes GSM

La arquitectura de las redes GSM consiste en tres bloques que en conjunto permiten la operación del sistema y a su vez se componen de diferentes elementos que realizan tareas específicas. Los componentes principales de la red GSM son el subsistema de estación base (BSS), el subsistema de conmutación y red (NSS) y el subsistema de operación y soporte (OSS).

Figura 1. **Arquitectura de la red GSM**



Fuente: *GSM Architecture*. <http://www.ques10.com/p/5206/explain-gsm-network-architecture-in-detail-2/>. Consulta: 1 de febrero de 2018.

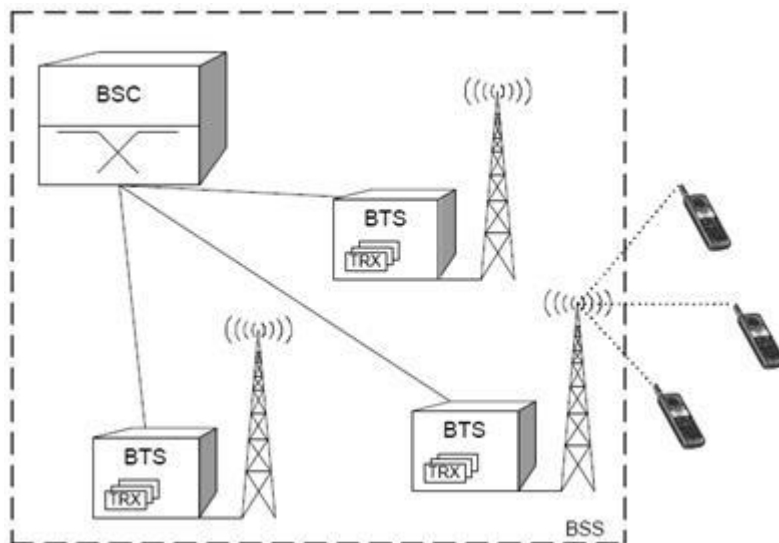
1.2.1.1.1. **Subsistema de Estación Base (BSS)**

Este subsistema constituye la interfaz entre los terminales móviles y el subsistema de red. Está conformado por el controlador de estación base (BSC) y sus correspondientes estaciones base (BTS). El BSS se encarga de controlar la red de radio, establecer la comunicación entre la terminal móvil y el subsistema de conmutación y red, procesar y transcódecificar la voz y recopilar estadísticas.

La unidad BTS es el elemento de red central de la estación base, ya que se compone de los dispositivos para la transmisión y recepción de radio. Este elemento es el encargado del procesamiento digital de las señales recibidas, la codificación de canal, entrelazado y transmisión de señales radioeléctricas hacia las terminales móviles. Una estación base consta de varios transceptores (TRX) que operan sobre las frecuencias asignadas al operador y se ocupan de

la transcodificación de la voz y la conversión entre formatos de codificación digital.

Figura 2. **BSS**



Fuente: *GSM, part 1 of 3*. <http://adikristanto.net/gsm-part-1-of-3/>. Consulta: 1 de febrero de 2018.

1.2.1.1.2. **Subsistema de Conmutación y Red (NSS)**

Este bloque de la red GSM se encarga del control de la llamada, el interfuncionamiento de redes, gestión de servicios, tarificación, gestión de seguridad y control del subsistema de estación base. Está compuesto por el centro de conmutación de servicios móviles, el registro de posición base, el registro de posición visitante, el centro de autenticación y el registro de identificación del equipo.

El centro de conmutación de servicios móviles (MSC) es el elemento principal del subsistema de red. Se encarga de la tarificación, la coordinación de

emisión y recepción de llamadas y algunas funciones de control del subsistema de estación base. Otro elemento del NSS es el registro de posición base (HLR), lugar en el que se almacenan los datos estadísticos del usuario o abonado, así como los datos relativos a la gestión de movilidad.

El registro de posición de visitante (VLR) es un bloque de memoria local que almacena la posición del abonado y las variables necesarias para la gestión de llamadas desde y hacia un abonado móvil. El VLR está asociado a uno o más centros de autenticación (AuC), el cual se ocupa de la información de seguridad e identidad del abonado. La información de seguridad del equipo móvil en la parte de hardware se almacena en el registro de identificación del equipo (EIR).

El último elemento del subsistema de conmutación y red es el GMSC (Gateway Mobile Switching Center), el cual se encarga de obtener información de posición y encaminamiento del HLR para dirigir la llamada al MSC a través del cual se brinda servicio al abonado.

1.2.1.1.3. Subsistema de Operación y Apoyo (OSS)

Este subsistema está conformado por el centro de operación (OMC) y mantenimiento y el centro de gestión de red (NCM), los cuales en conjunto proveen los medios para que el operador pueda interactuar entre distintos elementos del BSS o el NSS y se encargan de la gestión de servicios móviles y el cobro de cuota.

El OMC se encarga de la administración y operación comercial, la gestión de seguridad y datos relativos a cada terminal móvil, la configuración de los

aparatos de la red, el registro de los datos de tasación, transmisión, tráfico y alarmas y las tareas de mantenimiento. La gestión y el funcionamiento de la red son controlados por el NMC en conjunto con el OMC.

1.2.1.2. Servicios GSM

Las redes de segunda generación se diferencian de sus predecesoras por el cambio de tecnología analógica a digital, como también por la integración de algunos servicios que pueden ser categorizados como servicios básicos y suplementarios.

1.2.1.2.1. Servicios básicos

Los servicios básicos pueden dividirse en dos categorías: teleservicios y servicios portadores.

1.2.1.2.2. Teleservicios

Los teleservicios son aquellos que permiten al abonado comunicarse con otro abonado, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Voz
- Llamadas de emergencia
- Servicio de mensajes cortos (SMS)
- *Roaming*
- Buzón de voz
- Buzón de fax
- Voz y fax alternados

1.2.1.2.3. Servicios portadores

Los servicios portadores son aquellos que proveen la capacidad de transmitir señales entre puntos de red definidos, generalmente para la transmisión de datos. Estas señales permiten la prestación de servicios finales, de difusión y de valor añadido. Los principales servicios portadores que ofrecen las redes de segunda generación son:

- Tráfico hacia la red telefónica (PSTN).
- Tráfico hacia la red digital de servicios integrados (ISDN).
- Acceso a otras redes de datos asíncronos.
- Transmisión de información a distintas velocidades.
- Acceso a funciones de PAD (Packet Assembler/Disassembler).
- Acceso a redes públicas de datos.
- Transmisión de voz y datos durante una llamada.
- Selección de módem, selección de servicios de audio de 3.1KHz cuando se conecte a la ISDN.
- Soporte de solicitud automática de retransmisión ARQ.

1.2.1.3. Servicios suplementarios

Los servicios suplementarios complementan los teleservicios y servicios portadores y proveen al usuario un mayor alcance y control respecto a la interacción con la red telefónica. Los servicios suplementarios pueden clasificarse en:

- Servicios de identificación de números:
 - CLIP (*Calling Line Identification Presentation*): permite al usuario visualizar el número de teléfono del cual proviene determinada llamada entrante.
 - CLIR (*Calling Line Identification Restriction*): permite al emisor de la llamada deshabilitar el CLIP en el abonado receptor.
 - CoLP (*Connected Line Identification Presentation*): permite al abonado emisor de la llamada visualizar el número telefónico del abonado receptor.
 - CoLR (*Connected Line Identification Restriction*): permite al abonado receptor deshabilitar el CoLP en el móvil del abonado emisor.

- Servicios de completamiento de llamadas:
 - CW (*Call Waiting*): permite al abonado retener una llamada en espera, es decir, pausa la comunicación con la otra parte de la llamada sin necesidad de terminar la comunicación y tener que iniciar una nueva llamada.
 - CH (*Call Holding*): permite recibir una nueva llamada mientras se deja la llamada actual en espera.
 - CCBS (*Completion of Call to Busy Subscriber*): permite al emisor de la llamada monitorear el estado de otro teléfono al que intentó llamar y completar la llamada al encontrarse este desocupado.

- Servicios multiusuario:
 - 3PTY (*Three Party Service*): permite a un abonado intercomunicar dos llamadas y establecer comunicación simultánea entre este y dos abonados más.
 - CON (*Conference calling*): permite entablar una llamada en conferencia con hasta 5 abonados de forma simultánea.

- Servicios de cobro:
 - AoC (*Advice of Charge*): permite al abonado recibir información asociada al costo generado por una llamada en específico.
 - FPH (*Freephone Service*): permite al abonado pagar por las llamadas entrantes a su línea telefónica.
 - REV (*Reverse charging*): similar al FPH, permite al abonado pagar por llamadas entrantes a su línea telefónica, únicamente que con tarifas especiales.

- Servicios para restricción de llamadas:
 - BAOC (*Barring All Originating Calls*): deshabilita la emisión de todas las llamadas del móvil, manteniendo activa la recepción de llamadas entrantes.
 - BOIC (*Barring Outgoing International Calls*): permite deshabilitar la emisión de llamadas internacionales, manteniendo activa la emisión de llamadas locales y recepción de todo tipo de llamadas.
 - BOIC-exHC (*Barring Outgoing International Calls except to Home Country*): permite evitar que se realicen llamadas internacionales que no sean al país de origen del servicio.
 - BAIC (*Barring All Incoming Calls*): permite emitir cualquier tipo de llamadas y evita que se reciba cualquier tipo de llamadas.
 - BIC-Roam (*Barring Incoming Calls when Roaming*): cuando el dispositivo se encuentra en *roaming*, de igual forma que el BAIC, evita que se reciba cualquier tipo de llamadas.

- USSD (*Unstructured Supplementary Services Data*): este servicio constituye un protocolo para transmisión de información o instrucciones a través de la red GSM. A diferencia del servicio de SMS no posee capacidad de almacenamiento y reenvío, sin embargo, pueden enviarse mensajes de

hasta 182 caracteres de longitud. Para este servicio se gestiona una sesión que permanece abierta mientras sea utilizada por alguna aplicación, lo que permite que el tiempo de respuesta de aplicaciones que interactúen con este servicio sea corto.

Los comandos USSD comienzan con un asterisco y terminan con un signo numeral y son dirigidos de vuelta hacia el HLR, lo que hace que, aun cuando se utiliza *roaming*, pueda utilizarse el servicio de la misma forma que en una conexión con la red local.

1.2.2. GPRS (General Packet Radio Service)

Las redes GSM con esta tecnología implementada son consideradas como redes de generación 2.5. GPRS es una modificación a la forma de transmisión de datos en las redes de segunda generación, utilizando conmutación de paquetes sobre estas.

Esta tecnología permite asignar las ranuras de tiempo a la conexión de paquetes, de forma tal, que mientras el usuario no envíe datos, las frecuencias quedan libres para ser utilizadas por otro usuario que las necesite. Esto permite a los operadores ofrecer varios canales de comunicación y es posible tener terminales que gestionen cuatro canales simultáneos de bajada y dos de subida, aumentando considerablemente las velocidades de bajada y subida respecto a las redes GSM tradicionales.

1.2.2.1. Arquitectura GPRS

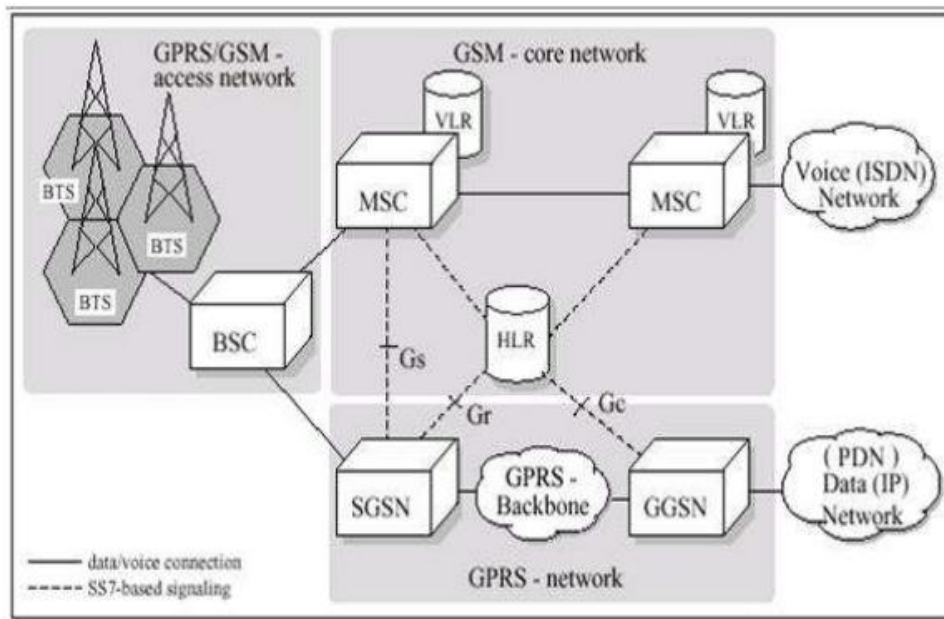
GPRS fue diseñado como una arquitectura abierta sobre la cual pudieran ser ofrecidos servicios IP que permitieran la integración de telefonía e Internet. Esta tecnología trata de reutilizar y aprovechar de forma eficiente los elementos de las redes GSM existentes. Sin embargo, GPRS requiere agregar nuevos elementos de red, interface, protocolos y realizar algunas modificaciones sobre algunos elementos existentes de la red GSM.

Las modificaciones y nuevos elementos necesarios para la implementación de GPRS son:

- Terminales móviles: se requiere nuevas terminales móviles para servicios de acceso GPRS debido a que los teléfonos existentes para GSM no manejan una interfaz de aire extendida ni paquetes de datos. Estas nuevas terminales deben ser compatibles con el estándar GSM para realizar llamadas de voz.
- Subsistema de Estación Base (BSS): debe realizarse una actualización del software existente en las estaciones base. Además debe actualizarse la Unidad de Control de Protocolos (PCU) en el controlador de estación base para que esta unidad pueda dirigir el tráfico de datos al sistema GPRS.
- Bases de datos: deben actualizarse todas las bases de datos del sistema para que puedan soportar las nuevas funciones involucradas en GPRS.
- Nodos de soporte GPRS: son nuevos elementos instalados en el núcleo de la red llamados Serving GPRS Support Node (SGSN) y Gateway GPRS Support Node (GGSN).
 - SGSN: es el elemento de red responsable de gestionar las funciones de movilidad, autenticación y registro en la red. Además se encarga de la entrega y enrutamiento de los paquetes de datos que se envían

- o reciben hacia o desde redes externas con el GGSN correspondiente.
- o GGSN: actúa como una interfaz lógica entre los paquetes recibidos o enviados desde o hacia redes externas. Convierte los paquetes provenientes del SGSN al formato apropiado de la red con la que se establece la conexión (Internet, X.25, entre otras).

Figura 3. **Arquitectura GPRS**
GPRS Architecture



Fuente: *General packet radio service*. <https://www.slideshare.net/hemangkothari/general-packet-radio-service-53137966>. Consulta: 1 de febrero de 2018

1.2.2.2. Servicios GPRS

GPRS admite nuevos servicios que presentan mejoras respecto a GSM en calidad de transmisión de voz y de datos, entre otras cosas. Los servicios implementados en GPRS son:

- Velocidad de transferencia superior a GSM (144Kbps).
- Servicios de punto a punto (PTP).
- Servicios de punto a multipunto (PTMP).
- Servicio de mensajes cortos (SMS).
- Tarificación por cantidad de datos transmitidos, no por tiempo de conexión.
- Mejora en la calidad de voz.

1.2.2.3. Terminales móviles GPRS

Existen tres tipos de terminales utilizados para esta tecnología: terminales clase A, clase B y clase C.

- Clase A: poseen dos transceptores que les permite soportar servicios GPRS y GSM (datos y voz) de forma simultánea.
- Clase B: son capaces de enviar datos y voz de forma no concurrente. Soportan GPRS y GSM, sin embargo, un servicio a la vez.
- Clase C: estas terminales pueden utilizarse para un servicio únicamente, dependiendo de la configuración elegida.

1.2.3. Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE)

EDGE o EGPRS es una tecnología implementada sobre redes GSM que a su vez tienen implementada la tecnología GPRS conocidas como redes 2.75G.

EDGE es una tecnología diseñada como una mejora a GPRS, por lo que se requiere actualizaciones simples en software y algunas tarjetas de canales adicionales, constituyendo una mejora significativa con bajo costo. Esta tecnología permite a las redes GSM manejar servicios 3G y es tan eficiente en espectro como otras tecnologías 3G competidoras. EDGE funciona con redes TDMA y utiliza la modulación 8PSK, la cual mejora significativamente el ancho de banda disponible. La velocidad efectiva también presenta una mejora significativa, con tasas de 130Kbps en promedio y picos de hasta 472Kbps.

Otra novedad en redes que implementan EDGE es la redundancia incremental, la cual agrega información a los paquetes enviados e incrementa de esta forma la probabilidad de decodificar correctamente el mensaje en el receptor sin necesidad de retransmitir todos los paquetes.

Las terminales móviles compatibles con EDGE son a su vez compatibles con GPRS y la arquitectura GSM en general. EDGE es una tecnología ampliamente utilizada debido a su bajo costo de implementación en relación a nuevas tecnologías, la variedad de servicios de datos soportados (mensajería, acceso a Internet y transmisión de audio y vídeo) y su eficiencia en espectro, que permite que pueda desplegarse dentro del espectro utilizado por los proveedores de servicio.

1.3. Redes móviles de tercera generación

Las redes de tercera generación se caracterizan por la unificación de la transmisión de voz y de datos con acceso inalámbrico a Internet y a velocidades altas de transmisión de datos. Estas redes están basadas en la tecnología UMTS y, además de utilizarse en terminales móviles, también trajeron consigo

el acceso a Internet por medio de módems para otros dispositivos como ordenadores personales.

1.3.1. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)

UMTS es un estándar ampliamente utilizado en redes de tercera generación. Está basado en la tecnología WCDMA con dos modos de operación (FDD y TDD), por lo que es muy eficiente en espectro y permite proporcionar diversos tipos de servicios con velocidades de hasta 384 Kbps.

Este estándar fue desarrollado para ser la evolución del estándar GSM, es decir, que exista un eficiente *handover* entre ambas tecnologías y un alto nivel de compatibilidad para que puedan operar juntos y que algunos elementos del estándar predecesor puedan ser utilizados de forma eficiente.

1.3.1.1. Arquitectura de sistemas UMTS

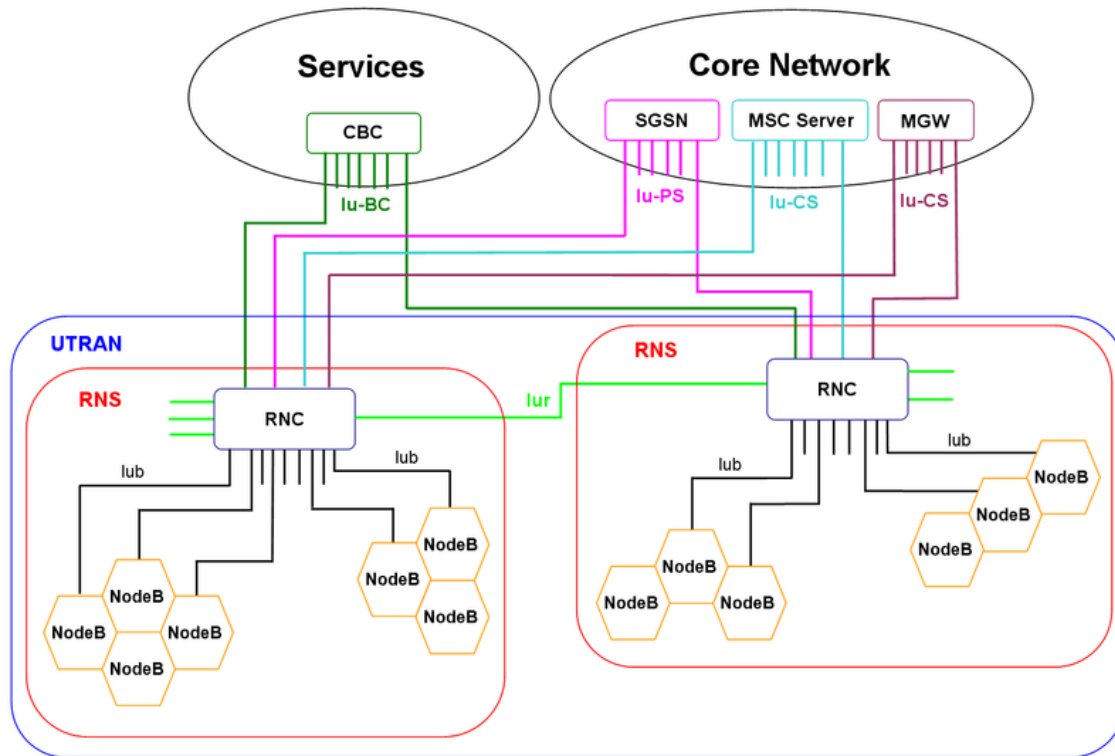
Los sistemas UMTS se componen de dos subredes: la red de telecomunicaciones y la red de gestión o administración. La subred de telecomunicaciones se encarga de transportar la información y la red de gestión se encarga de los registros, la tarificación, la seguridad y administración de datos junto con la resolución de fallas o anomalías y el restablecimiento en fallas de conexión.

UMTS está diseñada para desplegarse en redes GSM/GPRS, por lo que comparte elementos en común con sus tecnologías predecesoras y se compone de los siguientes elementos:

- Red central (*core network*)

- Red de acceso radio terrestre (UTRAN)
- Equipo de usuario

Figura 4. **Arquitectura UMTS**



Fuente: *UMTS Network Architecture*.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UMTS_Network_Architecture.png. Consulta: 1 de febrero de 2018

1.3.1.1.1. Red de acceso de radio terrestre (UTRAN)

Esta capa de la arquitectura es la encargada de establecer la conexión entre la red central y las terminales móviles vía radio. Está formada por subsistemas de red RNS (*Radio Network Subsystem*), las cuales a su vez están formadas por controladores RNC (*Radio Network Controller*) y un conjunto de estaciones base (nodos B).

- **Nodo B:** es una estación de radio en la que se encuentran situadas antenas y elementos de transmisión, a los que se comunican las terminales móviles de una célula UMTS. Este elemento desempeña funciones principalmente de nivel físico como codificación, modulación, entre otros.
- **Radio Network Subsystem (RNC):** este elemento se encarga de gestionar y administrar los recursos utilizados por uno o varios nodos B. Algunas de las tareas ejecutadas por este subsistema son el control de admisión, difusión de información, manejo de tráfico de canales, control de congestión, entre otros.

Las interfaces internas de UTRAN se dividen en dos tipos:

- **Interfaz Iub:** esta interfaz establece la conexión entre cada nodo B y su respectivo RNC. Además se encarga de la transmisión de direcciones físicas (MAC) entre estos.
- **Interfaz Iur:** esta interfaz establece la conexión entre diferentes RNC y permite la comunicación entre estos para el soporte de trasposos suaves en los que se transmiten tramas MAC entre RNC servidores y auxiliares.

Existen dos interfaces externas: interfaz Iu e interfaz Uu, que se encargan de establecer la conexión entre la red de acceso radio (UTRAN) y el núcleo de red y de establecer la comunicación con las terminales móviles, respectivamente.

1.3.1.1.2. Red Central (core network)

Este subsistema de UMTS incorpora las funciones de inteligencia y transporte como señalización, conmutación y administración de movilidad.

También se encarga de establecer la conexión entre otras redes de telecomunicaciones.

1.3.1.1.3. Equipo de usuario (terminales móviles UMTS)

El equipo de usuario, al igual que en la pasada implementación de nuevas tecnologías, debe ser capaz de soportar tarjetas SIM UMTS. De igual forma, debe ser capaz de interactuar con las tecnologías anteriores e intercambiar entre UMTS, GPRS y GSM.

1.3.1.2. Servicios UMTS

Las redes UMTS son capaces de transmitir voz y datos de forma simultánea e incorporan distintos servicios que se ejecutan de distintas formas, que pueden ser clasificadas en:

- **Conversacionales:** servicios en tiempo real que mantienen un tiempo de retardo corto en transmisión de paquetes, empleados en llamadas de voz o videoconferencias.
- **Streaming:** servicios en tiempo real que mantienen un tiempo de retardo constante en transmisión de paquetes utilizados en vídeo.
- **Interactiva:** servicios con modelo de petición-respuesta que mantienen un tiempo de retardo moderado y baja tasa de error utilizados en acceso a Internet.
- **Background:** servicios que no necesitan de interacción que se ejecutan de fondo como el correo electrónico, entre otros.

1.3.2. High-Speed Packet Access (HSPA)

Esta tecnología presenta una mejora respecto a los sistemas UMTS en la transmisión de datos, mejorando los 384 Kbps de velocidad de descarga de estos sistemas. HSPA fue introducido en diferentes etapas, primero se introdujo HSDPA (High Speed Down Link Packet data Access), luego HSUPA (High Speed Up Link Packet data Access) y posteriormente una evolución o versión mejorada llamada HSPA+ (Evolved HSPA).

1.3.2.1. HSDPA (High Speed Down-Link Packet data Access)

Esta tecnología fue introducida para mejorar la velocidad de descarga aumentándola hasta 14.4 Mbps, utilizando diferentes canales que permiten transmitir mayor cantidad de datos y a tasas de transferencia más altas.

Estas tasas de descarga se lograron principalmente por el uso de la modulación 16-QAM, en contraste a la modulación QPSK utilizada en sistemas WCDMA, lo cual permite incrementar la velocidad de transmisión de datos con mayor inmunidad al ruido, mejorando la cifra de señal a ruido y disminuyendo la necesidad de alta redundancia.

1.3.2.2. HSUPA (High Speed Up-Link Packet Data Access)

Análogo a HSDPA, esta tecnología fue introducida para mejorar el enlace de subida, estableciendo una mejora considerable en la velocidad de subida para los equipos de usuario. Contrario a los enlaces de subida, no se requiere

velocidades de transferencia tan altas, por lo que las velocidades alcanzadas con HSUPA (5,74 Mbps) son inferiores a las de bajada con HSDPA.

En este caso, HSUPA implementa tasas de transmisión de datos más altas, menor latencia (intervalos de tiempo de transmisión de 2ms) y mayor capacidad para manejo de grandes cantidades de datos que implican soporte a mayor número de usuarios simultáneamente.

1.3.3. Evolved HSPA o HSPA+

HSPA+ o HSPA evolucionado, es un estándar adoptado en el séptimo lanzamiento de 3GPP que implementa tasas de transferencia superiores a las que trajo consigo HSPA y consecuentemente las tecnologías anteriores a esta.

HSPA+ incorpora nuevas tecnologías en arreglos de antenas como *beamforming* y *MIMO*, junto con modulación de orden superior ya introducida anteriormente con HSDPA y HSUPA, lo cual mejora la eficiencia de la red y permite a los usuarios experimentar una mayor calidad de servicio con relación a las redes WCDMA antecesoras.

Entre las características más importantes se encuentran:

- **MIMO:** Multiple Input, Multiple Output es un método que permite aumentar la capacidad de un radioenlace y la tasa de transmisión aprovechando la propagación multicamino.
- **Beamforming:** es una técnica de procesamiento de señales utilizada en arreglos de antenas para direccionar el haz en el que se transmite la información, mejorando la directividad y por ende la cobertura en regiones en específico.

- Modulación de orden superior: al igual que en HSDPA es posible incrementar el orden de la modulación para proveer conexiones más rápidas, dependiendo del nivel de potencia con la que pueda transmitirse las señales.
- Conectividad de paquetes continua.
- Mejoras en protocolos de capa 2: se introdujeron los protocolos MAC-hs que permiten aprovechar de mejor forma las tasas de transmisión de datos.

1.4. Redes móviles de cuarta generación

Las redes 4G se caracterizan por las altas velocidades de carga y descarga que superan a las alcanzadas en HSPA+. Además procuran mantener una alta calidad de servicio (QoS) y un nivel alto de seguridad.

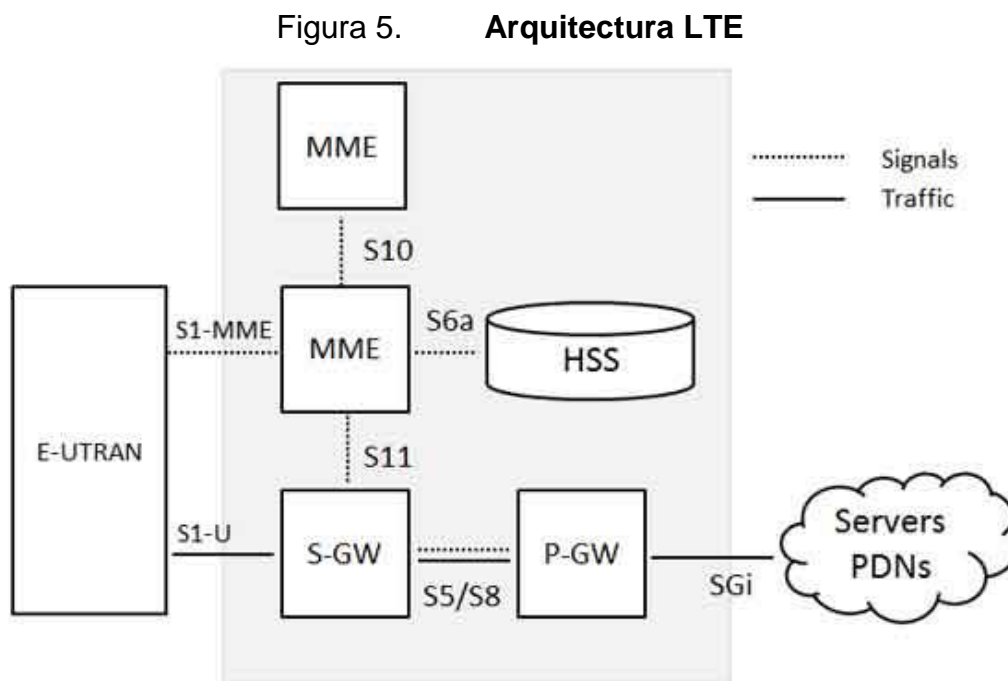
1.4.1. Long Term Evolution (LTE)

LTE es el estándar de cuarta generación que nace a partir de la demanda de mayor eficiencia espectral, tasas de transferencia más altas y mayor disponibilidad de ancho de banda respecto a las tecnologías anteriores. Está compuesto de la parte de acceso E-UTRAN o Evolved UTRAN y el núcleo de red EPC (*Evolved Packet Core*). LTE está basado en IP, es decir los servicios en tiempo real también están implementados por medio de este protocolo.

LTE está basado en acceso múltiple por división ortogonal de frecuencia (OFDMA) en combinación con modulación de orden superior 64QAM y un ancho de banda de hasta 20MHz.

1.4.1.1. Arquitectura LTE

La arquitectura de estas redes constituye una mejora a la topología de sus antecesoras. Se compone de la parte de acceso y el núcleo de la red.



Fuente: *LTE Network Architecture*.

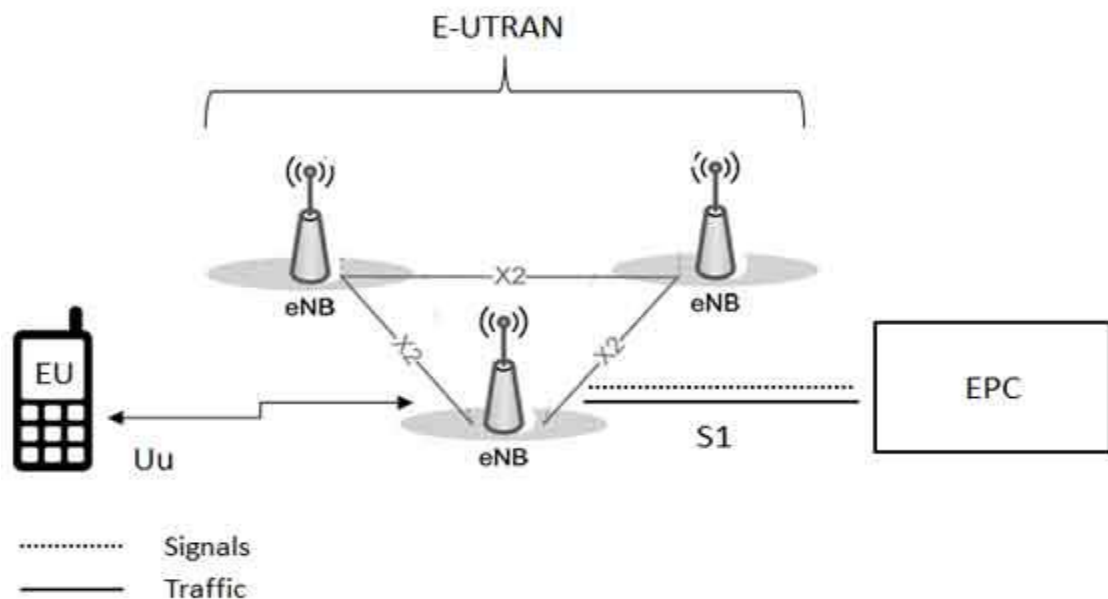
https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm. Consulta: 1 de febrero de 2018.

1.4.1.1.1. Evolved UTRAN

Esta subred o red de acceso se compone de un conjunto de estaciones base llamadas también nodos B evolucionados o eNodeB, los cuales están interconectados y se encargan de establecer la conexión con las terminales móviles en una celda. Los nodos pueden administrar múltiples celdas y controlan las funciones de operación de bajo nivel de los móviles conectados a estos.

Cada nodo cumple un conjunto de funciones que comprenden la administración de los recursos de radio, la encriptación de la información, la compresión de los *headers* de IP y la comunicación con el núcleo de red. Los nodos se comunican entre sí utilizando una interfaz llamada “X2” y se comunican hacia el EPC por medio de la interfaz denominada “S1”.

Figura 6. **E-UTRAN**



Fuente: *LTE Network Architecture*.

https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm. Consulta: 1 de febrero de 2018.

1.4.1.1.2. **Evolved Packet Core (EPC)**

El EPC es un núcleo de red basado en IP y conmutación de paquetes. Se encuentra conformado por tres nodos lógicos principales: PDN Gateway, Serving Gateway y la Mobility Management Entity.

- P-GW (*PDN Gateway*): se encarga de almacenar las direcciones IP y de establecer la comunicación con las redes externas. También ejecuta las funciones que realizaban el GGSN y el SGSN en las redes UMTS.
- S-GW (*Serving Gateway*): se encarga de transferir todos los paquetes IP, es decir, actúa como un enrutador y transfiere los datos entre la estación base y el P-GW. También se encarga de recopilar información de tarificación, relativa a la cantidad de datos enviada o recibida por un usuario.
- MME (*Mobility Management Entity*): se encarga de controlar las funciones de operación de alto nivel, como el procesamiento de señales entre las terminales móviles y el núcleo de red.

Existen otros nodos lógicos llamados HSS (*Home Subscriber Server*) y PCRF (*Policy Control and Charging Rules Function*), que se encargan de almacenar la información de los abonados y de utilizar la información de los mismos para establecer funciones de tarificación en relación a las suscripciones del abonado, respectivamente.

1.5. Telefonía celular en Guatemala

Guatemala actualmente cuenta con tres compañías líderes en el mercado de comunicaciones móviles que operan en bandas de frecuencia reguladas por la Superintendencia de Telecomunicaciones (SIT), creada a partir de la Ley General de Telecomunicaciones de Guatemala, que además establece los parámetros de los puntos de señalización y numeración, así como la distribución del espectro de frecuencias que, en este caso, define la frecuencia central de operación y el ancho de banda asignado para cada una de las empresas en el mercado.

De acuerdo a información proporcionada por el Registro de Telecomunicaciones administrado por la SIT, las frecuencias de operación y el usufructo de frecuencias se encuentra distribuido de la forma siguiente:

Tabla I. **Parámetros de operación de empresas de telefonía en Guatemala**

Nombre de la empresa	Telecomunicaciones de Guatemala, S.A.	Comunicaciones Celulares, S.A.	Telefónica Móviles Guatemala, S.A.
Nombre comercial	Claro	Tigo	Movistar
Logotipo			
Frecuencia de operación	1900 MHz	850 MHz	1900 MHz
Usufructo de frecuencias	1930 – 1950 MHz	825-835 MHz 870-880 MHz 835- 845 MHz 880-890 MHz 845-849 MHz 890-894MHz 899-905MHz	1950-1965MHz 1965-1975MHz 1975-1990MHz
Ancho de banda total adjudicado	20 MHz	54 MHz	40 MHz

Fuente: elaboración propia, con base en información proveída por el Registro de Telecomunicaciones de Guatemala.

Actualmente los tres operadores ofrecen conectividad LTE sujeta a cobertura por medio de una tarjeta SIM compatible con dicha tecnología. Además, ofrecen una amplia gama de planes de acreditación de minutos y datos (entre otros) prepago y crédito (postpago), con diferentes opciones en precio y volumen acreditado en cada categoría.

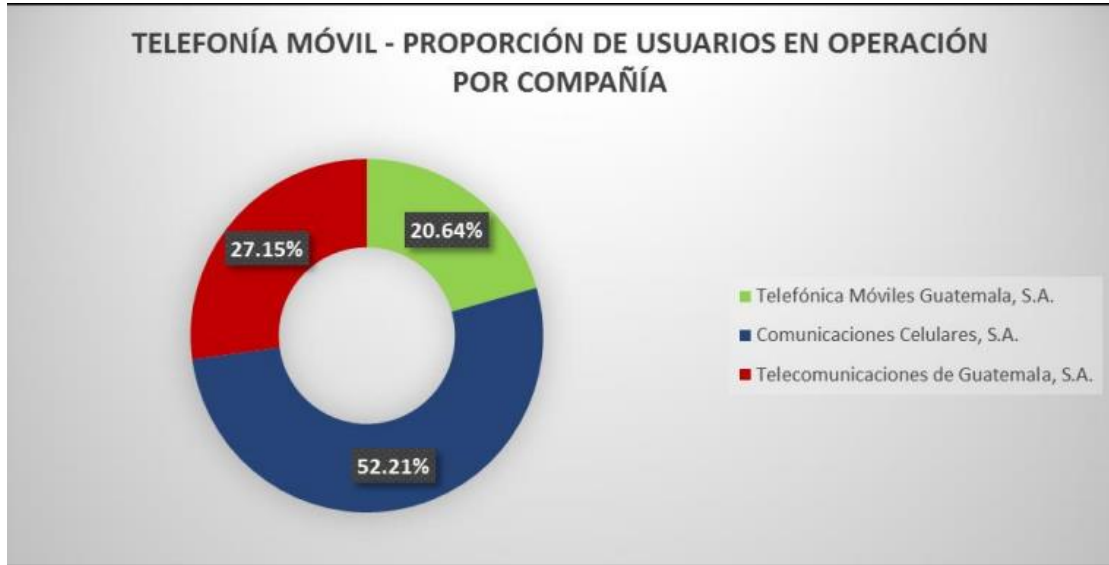
Según el boletín estadístico del segundo semestre del año 2017 emitido por la SIT, los usuarios en operación sobrepasan los 19 millones y se componen en su mayoría (94,18 %) de usuarios con planes prepago. Además, el mercado de telefonía se compone principalmente de usuarios móviles que en proporción a los usuarios de líneas fijas representan el 89,04 % del número de usuarios.

Tabla II. **Líneas en operación de telefonía móvil**

Operador	Usuarios en operación	Proporción por compañía
Telefónica Móviles Guatemala, S.A.	4,124,355	20.64%
Comunicaciones Celulares, S.A.	10,435,379	52.21%
Telecomunicaciones de Guatemala, S.A.	5,426,748	27.15%
Total	19,986,482	100%

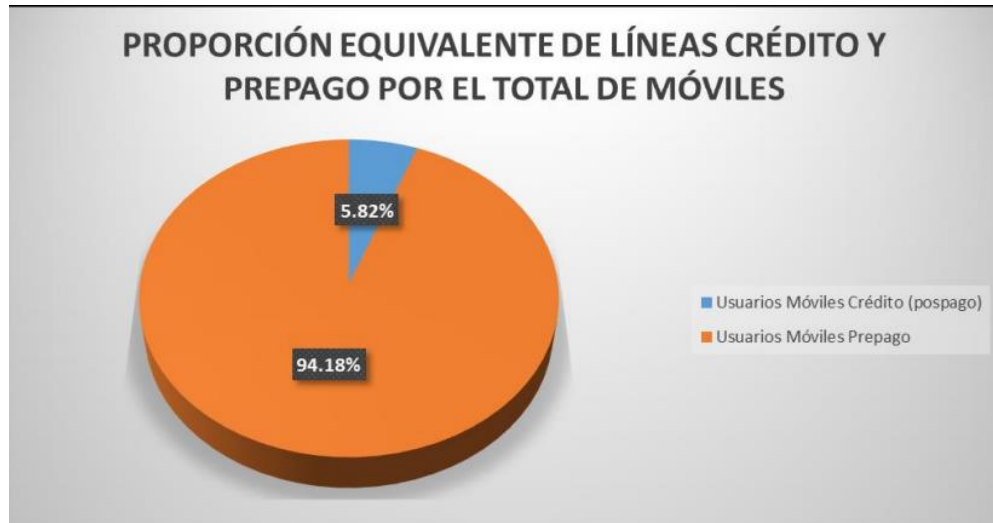
Fuente: SIT. *Boletín Estadístico de Telefonía*. 2do semestre de 2017.

Figura 7. **Proporción de usuarios en operación por compañía**



Fuente: SIT. *Boletín Estadístico de Telefonía*. 2do semestre de 2017.

Figura 8. **Proporción de líneas de crédito (postpago y prepago)**



Fuente: SIT. *Boletín Estadístico de Telefonía*. 2do semestre de 2017.

El tráfico generado por la telefonía móvil supera los 13 mil millones de minutos y se compone del tráfico generado desde líneas móviles hacia líneas fijas, líneas móviles hacia líneas móviles y el generado y terminado en la red

móvil de cada uno de los operadores, siendo el operador conocido comercialmente como Tigo el que maneja el mayor volumen de tráfico en todas las categorías, a excepción del tráfico entre líneas móviles en donde lo supera el operador Claro.

Tabla III. **Tráfico nacional generado por cada operador**

Operador	Tráfico generado de su red móvil a redes fijas (mins.)	Tráfico generado de su red móvil a redes móviles (mins.)	Tráfico generado y terminado dentro de su propia red (mins.)
Telefónica Móviles Guatemala, S.A.	24,643,601	296,197,122	454,942,517
Comunicaciones Celulares, S.A.	143,893,705	916,084,072	6,687,760,024
Telecomunicaciones de Guatemala, S.A.	203,156,046	986,218,421	3,844,934,352
Total	371,693,352	2,198,499,615	10,987,636,893

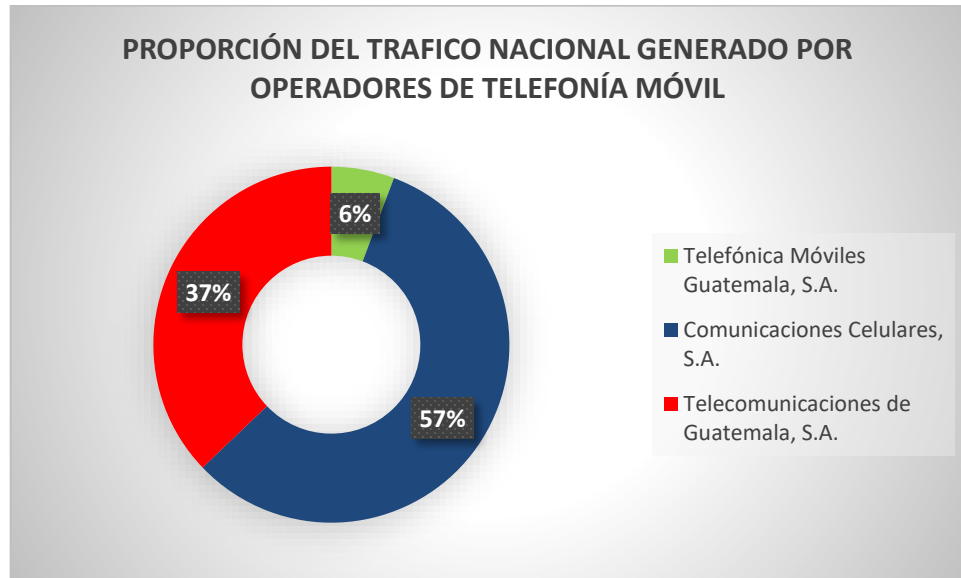
Fuente: SIT. *Boletín Estadístico de Telefonía*. 2do semestre de 2017.

Tabla IV. **Total de tráfico nacional generado por cada operador**

Operador	Total de tráfico generado hacia todas las redes nacionales	Proporción total del tráfico por operador
Telefónica Móviles Guatemala, S.A.	775,783,240	5.72%
Comunicaciones Celulares, S.A.	7,747,737,801	57.15%
Telecomunicaciones de Guatemala, S.A.	5,034,308,819	37.13%
Total	113,557,829,860	100.00%

Fuente: SIT. *Boletín Estadístico de Telefonía*. 2do semestre de 2017.

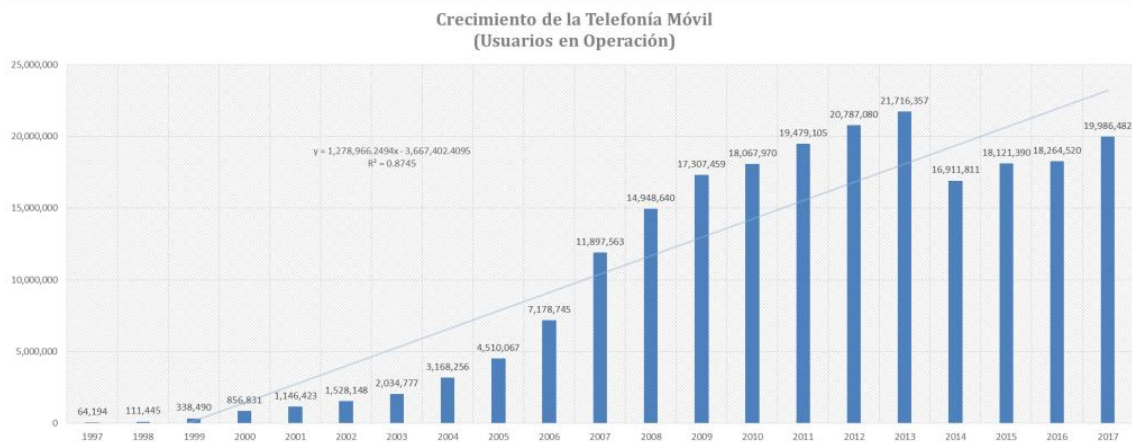
Figura 9. **Proporción del tráfico nacional generado por cada operador**



Fuente: SIT. *Boletín Estadístico de Telefonía*. 2do semestre de 2017.

El mercado telefónico en Guatemala tiene una tendencia de crecimiento que alcanzó el mayor número de usuarios en operación en el año 2012, teniendo al año siguiente una baja significativa y de nuevo tendiendo a la alza en los últimos años. Cada vez las terminales móviles son más asequibles y comunes a lo largo del territorio nacional. En la siguiente figura se presenta el comportamiento de crecimiento de la telefonía móvil a lo largo de los últimos años.

Figura 10. **Comportamiento histórico del crecimiento de la telefonía móvil en Guatemala**



Fuente: SIT. *Boletín Estadístico de Telefonía*. 2do semestre de 2017.

Actualmente, en el Departamento de Guatemala, se encuentran desplegadas 6 764 radiobases, siendo esta cantidad la mayor de todo el país. De la cantidad total de sitios o radiobases del Departamento de Guatemala, en la Ciudad de Guatemala se encuentran 3 361, siendo esta cantidad la mayor de todo el departamento.

1.5.1. Tarifas y precios de operadores de red local

Según información contenida en el boletín de tarifas y precios del segundo semestre del año 2017 emitido por la SIT, las tarifas aprobadas para las tres compañías de telecomunicaciones móviles líderes en el mercado están dadas por los siguientes precios comerciales:

Figura 11. Precios de planes móviles postpago de Movistar

Pospago Móvil					
Planes	Plan	Pago	Minutos	Mensajes *	Internet
Planes Móvil Libre	Cero Clavos 3GB	Q 125.00	200	2500	3GB
	Cero Clavos 6GB	Q 175.00	400	2500	6GB
	Cero Clavos 9GB	Q 225.00	600 / 2500 on net	2500	9GB
	Cero Clavos 12GB	Q 325.00	1800 / 2500 on net	2500	12GB
	Cero Clavos 30GB	Q 525.00	1800 / 2500 on net	2500	30GB
	Cero Clavos Ilimitado	Q 325.00	1800 / 2500 on net	2500	50GB
Planes Móvil	Cero Clavos 2GB Flex	Q 150.00	200	2500	3GB
	Cero Clavos 4GB Flex	Q 225.00	400	2500	6GB
		Q 275.00	600 / 2500 on net	2500	9GB
		Q 375.00	1800 / 2500 on net	2500	12GB
		Q 575.00	1800 / 2500 on net	2500	30GB
	Cero Clavos 8GB Flex	Q 375.00	1800 / 2500 on net	2500	50GB

Nota: Los minutos all net son válidos para llamadas Nacionales y LDI a USA, Canadá y la red Movistar de C.A.
* A otros Operadores

Fuente: SIT. Informe de tarifas. 2do semestre de 2017.

Figura 12. Tarifas LDI prepago de Movistar

TARIFAS LDI PREPAGO					
Plan	Ahorra Siempre (C1)		A Toda Hora FW (EL)		
Destino	Tipo Tarifa	Por Minuto	Tipo Tarifa	Por Minuto	
Móviles Telefónica	Minuto	Q 0.33	Minuto	Q	0.85
Móviles Otros Operadores	Minuto	Q 0.33	Minuto	Q	0.85
Fijos Movistar	Minuto	Q 0.33	Minuto	Q	0.85
Fijos Otros Operadores	Minuto	Q 0.33	Minuto	Q	0.85
LDI USA/Canadá	Minuto	Q 0.33	Minuto	Q	0.85
LDI Movistar C.A. (Guatemala, Nicaragua, Costarica, Panamá)	Minuto	Q 0.33	Minuto	Q	0.85
LDI Otros	Minuto	*	Minuto	*	
SMS Local (On/Off net)	Evento	Q 0.33	Evento	Q	0.25

* Aplican Tarifas Vigentes Prepago

Fuente: SIT. Informe de tarifas. 2do semestre de 2017.

Figura 13. **Tarifas de planes postpago con contrato de Tigo**

Planes con Contrato							
Cuota mensual	Q 199	Q 249	Q 299	Q 399	Q 499	Q 599	Q 799
Minutos	100	100	200	400	Sin límites a usuarios Tigo, a todas las compañías y larga distancia		
	A otras compañías y larga distancia	Sin límites a usuarios Tigo. Minutos aplican a otras compañías y larga distancia					
Whatsapp	Sin Límites						
App Ilimitada	No Incluido		Facebook. Promo válida los primeros 3 meses. Aplica renovación y líneas nuevas	Facebook, Waze. Promo válida los primeros 3 meses. Aplica renovación y líneas nuevas	Facebook, Waze, Twitter. Promo válida los primeros 6 meses. Aplica renovación y líneas nuevas	Facebook, Waze, Twitter, Deezer. Promo válida los primeros 36 meses. Aplica renovación y líneas nuevas	Facebook, Waze, Twitter, Deezer, Instagram. Promo válida los primeros 6 meses. Aplica renovación y líneas nuevas
Deezer	No Incluido				Con esta licencia se pueden crear playlists, descargar música y escucharla sin conexión a datos		
Internet	2 GB	3 GB	5 GB	7 GB	9 GB	12 GB	16 GB
SMS	Sin Límite						
Roaming	Roaming C.A., Internet incluido en el plan, llamadas a Q1.99/min						Roaming USA-Colombia, Internet incluido en el plan, llamadas a Q1.99/min

Fuente: SIT. *Informe de tarifas. 2do semestre de 2017.*

Figura 14. **Tarifas de planes postpago con contrato de Tigo**

Planes sin Contrato						
Cuota mensual	Q 199	Q 199	Q 249	Q 299	Q 399	Q 499
Minutos	Sin límites a usuarios Tigo, a todas las compañías y larga distancia	100	400	Sin límites a usuarios Tigo, a todas las compañías y larga distancia	Sin límites a usuarios Tigo, a todas las compañías y larga distancia	
		Sin límites a usuarios Tigo. Minutos aplican a otras compañías y larga distancia				
Whatsapp	No Incluido	Sin Límites				
App Ilimitada	No Incluido		Waze. Promo válida los primeros 3 meses. Aplica renovación y líneas nuevas	Facebook, Waze y Twitter. Promo válida los primeros 3 meses. Aplica renovación y líneas nuevas	Facebook, Waze, Twitter y Deezer. Promo válida los primeros 6 meses. Aplica renovación y líneas nuevas	Facebook, Waze, Twitter, Deezer e Instagram. Promo válida los primeros 6 meses. Aplica renovación y líneas nuevas
Deezer	No Incluido					
Internet	250 MB	3 GB	4 GB	6 GB	10 GB	16 GB
SMS	Sin Límite					
Roaming	Roaming C.A., Internet incluido en el plan, llamadas a Q1.99/min					

Fuente: SIT. *Informe de tarifas. 2do semestre de 2017.*

Figura 15. Tarifas de planes postpago de Claro 1/2

Pospago Móviles 1/2							
Descripción	Conectado 2000	Conectado 4000	Ilimitado 6000	Ilimitado 9000	Ilimitado 15000	Ilimitado 18000	Ilimitado 25000
Renta	Q 130.00	Q 199.00	Q 299.00	Q 399.00	Q 499.00	Q 599.00	Q 799.00
Minutos	200 On/Off Net	300 On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net
SMS	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net
Sin Fronteras	Datos/Llamadas/SMS MX y CA	Datos/Llamadas/SMS Canadá-Panamá	Datos/Llamadas/SMS Canadá-Panamá	Datos/Llamadas/SMS Canadá-Panamá	Datos/Llamadas/SMS Canadá-Panamá	Datos/Llamadas/SMS Canadá-Panamá	Datos/Llamadas/SMS Canadá-Panamá
SVA	N/A	Claro Música Ilimitado	Claro Música Ilimitado	Claro Música Ilimitado	Claro Música Ilimitado	Claro Música Ilimitado	Claro Música Ilimitado
Promoción	Redes Sociales Ilimitado 3 meses	Redes Sociales Ilimitado 6 meses	----	----	----	----	----

Fuente: SIT. Informe de tarifas. 2do semestre de 2017.

Figura 16. Tarifas de planes postpago de Claro 2/2

Pospago Móviles 2/2					
Descripción	Sin Compromisos 2500	Sin Compromisos 5000	Sin Compromisos 9000	Sin Compromisos 12000	Sin Compromisos 20000
Renta	Q 130.00	Q 199.00	Q 299.00	Q 399.00	Q 499.00
Minutos	200 On/Off Net	300 On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net
SMS	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net	Ilimitados On/Off Net
Sin Fronteras	Datos/Llamadas/SMS MX y CA	Datos/Llamadas/SMS Canadá-Panamá	Datos/Llamadas/SMS Canadá-Panamá	Datos/Llamadas/SMS Canadá-Panamá	Datos/Llamadas/SMS Canadá-Panamá
SVA	Redes Sociales Ilimitado	Redes Sociales y CM Ilimitado	Redes Sociales y CM Ilimitado	Redes Sociales y CM Ilimitado	Redes Sociales y CM Ilimitado
Promoción	----	----	----	----	----

Fuente: SIT. Informe de tarifas. 2do semestre de 2017.

2. PLANIFICACIÓN DE REDES CELULARES Y PARÁMETROS DE CALIDAD DE COBERTURA

Para establecer una red celular es necesario considerar distintos parámetros que permitan brindar un servicio óptimo en el área de cobertura establecida. La planificación de la red abarca la planificación de cobertura, la planificación de frecuencias y la planificación de la capacidad. Todo esto permite brindar a los operadores cierto nivel de calidad de servicio (QoS).

2.1. Planificación de cobertura

La planificación de cobertura consiste en definir el área o zonas geográficas en las que se prestarán los servicios de telecomunicaciones. Esta área o región es definida por los proveedores de servicio, es decir, las estaciones móviles o sitios establecidos, pero depende a su vez de la ubicación de los usuarios dentro de una celda y también las características de la terminal móvil que se utilice para interactuar con la red.

La calidad de la interacción con la red telefónica depende directamente del nivel de potencia recibido por la terminal móvil del usuario y esto, a su vez, depende de su ubicación dentro del área de cobertura y la cantidad de obstáculos que haya entre este y el sitio que provee la señal radioeléctrica.

Para garantizar óptima cobertura es necesario planificar la posición de los sitios móviles para garantizar que exista uniformidad en la mayor parte de la celda que sea posible y que pueda accederse fácilmente para realizar mantenimiento preventivo y correctivo. De esta forma, la planificación de la red

es uno de los pasos más importantes, ya que debe preverse el posible crecimiento de la red y por lo tanto la continuidad en la cobertura.

2.1.1. Consideraciones de radioenlace

Para establecer un enlace de radio es necesario determinar las características de los transmisores en función de los resultados esperados. Los aspectos más significativos a considerar son el tipo de antena a utilizar y el tipo de estructura que se utilizará para la instalación de la misma.

2.1.1.1. Tipos de antena

En la teoría y en la práctica existen diversos tipos de antena que representan distintas formas de distribuir la potencia irradiada hacia un medio. Elegir el tipo de antena apropiado es un aspecto muy importante en un radioenlace, ya que en la práctica es importante irradiar sectores específicos con características definidas. Una forma muy general de clasificar las antenas es por su forma de emitir potencia, siendo esta omnidireccional o direccional.

- **Omnidireccional:** una antena omnidireccional es una construcción teórica que se utiliza con fines de análisis considerando una antena que radia potencia uniformemente en todas las direcciones. En la práctica no existen antenas omnidireccionales, sin embargo, puede utilizarse arreglos de antenas que permitan irradiar con niveles similares de potencia en todas las direcciones.
- **Direccional:** contrario a su contraparte omnidireccional, las antenas direccionales se denominan de esta forma debido a su capacidad de concentrar la mayor intensidad de potencia en una dirección específica,

radiando sectores con mayor intensidad a otros, siendo su cobertura no uniforme en todas las direcciones.

Algunos tipos de antenas utilizadas en la práctica y sus principales características son:

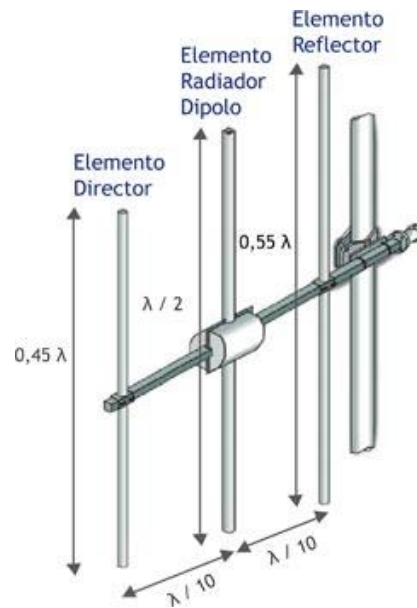
- Antenas tipo dipolo: estas antenas son antenas sencillas de fácil fabricación utilizadas ampliamente en transmisión de HF y FM. Se denominan dipolos debido a su construcción a partir de un conductor seccionado en dos partes cuya longitud se encuentra relacionada a la longitud de onda que desee transmitirse o recibirse.



Fuente: CÁRCAMO, Angélica. *Tipos de antena*. <https://radioslibres.net/20-que-tipos-de-antenas-existen/>. Consulta: 27 de julio de 2018.

- Antenas tipo Yagi: son antenas direccionales compuestas de múltiples elementos (directores y reflectores) que brindan la capacidad de concentrar la potencia radiada en una sola dirección, al igual que mejorar la potencia recibida proveniente de una dirección específica. Son antenas ampliamente utilizadas en enlaces de TV y FM.

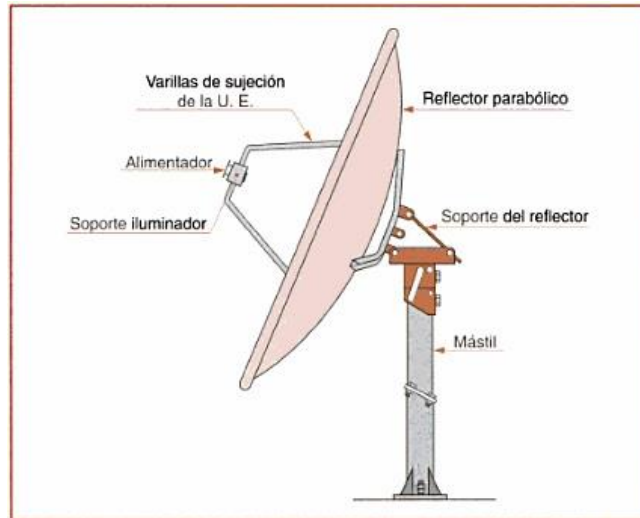
Figura 18. Antena tipo Yagi



Fuente: CÁRCAMO, Angélica. *Tipos de antena*. <https://radioslibres.net/20-que-tipos-de-antenas-existen/>. Consulta: 27 de julio de 2018.

- Antenas tipo panel: son antenas que consisten de arreglos de antenas tipo dipolo utilizadas ampliamente en telefonía celular y en radioenlaces en las bandas VHF y UHF. Estas antenas pueden utilizarse como antenas omnidireccionales debido a su configuración.
- Antenas parabólicas: estas antenas se componen de un plato reflector con forma parabólica y un foco receptor. Brindan un nivel alto de direccionalidad y son utilizadas en enlaces que requieren de alta ganancia, ya que toda la potencia recibida es concentrada y emitida en una sola dirección.

Figura 19. **Antena parabólica**



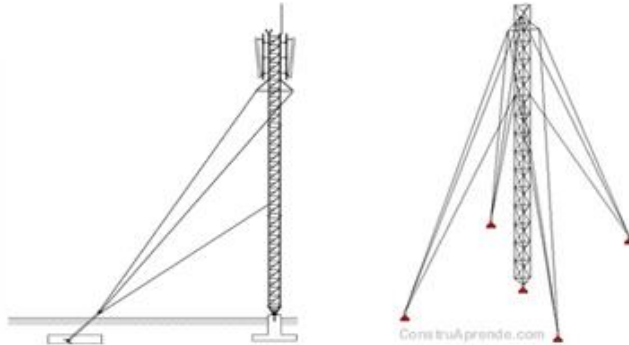
Fuente: *Tipos de antenas*. <http://antenas13.blogspot.com/p/tipos-de-antenas.html>. Consulta: 27 de julio de 2018.

2.1.1.2. **Tipos de estructura para antenas**

Los tipos de estructura o tipos de torre donde se colocan las antenas varían en tamaño y tipo de construcción conforme las aplicaciones requeridas, las restricciones de urbanización, el espacio y la cantidad de antenas que desea montarse. Algunas de las estructuras más utilizadas en Guatemala para instalación de antenas de telefonía son:

- Torres arriostradas o atirantadas: este tipo de estructura incluye tirantes o arriostres como soporte. Para una torre de este tipo se requiere un espacio amplio para los tirantes y pueden alcanzar alturas superiores a los 60 metros, sin embargo deben utilizarse con cargas moderadas. Una torre arriostrada se refiere mayormente al soporte de la torre únicamente y no define un tipo concreto de torre, por lo que puede atirantarse diferentes tipos de torre. Normalmente sobre inmuebles existentes se instalan torres arriostradas.

Figura 20. **Torre arriostrada**



Fuente: *Ciencia y tecnología en telecomunicaciones*.

http://fractalessac.com/index.php?option=com_content&view=article&id=104&Itemid=166.

Consulta: 27 de julio de 2018.

- Torres autoportadas: son utilizadas cuando existen limitaciones en terreno y acceso. Consisten en general de una sección triangular o cuadrada y son poco sensibles a los efectos de la torsión, alcanzando alturas de hasta 81 metros. Pueden utilizarse con un amplio número de antenas instaladas debido a sus características.

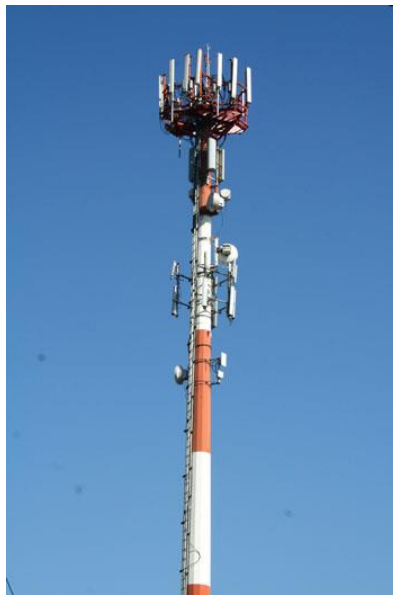
Figura 21. **Torre autoportada**



Fuente: *Autoportadas triangulares*. <http://www.matesa.net/torrautotri.htm>. Consulta: 27 de julio de 2018.

- Torres tipo monopolo o monoposte: consisten de secciones circulares o poligonales y pueden ser cilíndricas o cónicas. Se utilizan cuando existen limitantes en el tamaño del terreno disponible para instalación y pueden alcanzar alturas de hasta 42 metros.

Figura 22. **Torre tipo monoposte**



Fuente: *Antenas de sistemas celulares*. <http://www.spw.cl/spip.php?rubrique29>. Consulta: 27 de julio de 2018.

- Torres tipo monoposte ecológico: estas estructuras consisten de una torre tipo monoposte con camuflaje que permite disminuir la contaminación visual generada por la instalación de estructuras de gran tamaño. Son utilizadas en áreas protegidas y regiones ecológicas en donde se desee disminuir el impacto visual de los elementos.

Figura 23. **Poste tipo monoposte ecológico**



Fuente: *Servicios de camuflaje ecológico*. <http://www.guzman-nacich.com.ar/servicios.html>.

Consulta: 27 de julio de 2018.

2.1.2. **Presupuesto de enlace (*link budget*)**

El presupuesto de un enlace es la evaluación en conjunto de todas las pérdidas y ganancias que existen en un sistema de comunicación. Este presupuesto es utilizado para estimar la intensidad de señal en un receptor, por lo que es de especial atención al momento de establecer el área de cobertura de una red.

La potencia recibida está dada por la ecuación:

$$\begin{aligned} P. \text{ Recibida (dB)} & & (2.1) \\ &= P. \text{ Transmitida (dB)} + \text{ Ganancias (dB)} \\ &- \text{ Pérdidas (dB)} \end{aligned}$$

Esta ecuación no indica explícitamente las fuentes de pérdidas y ganancias en un sistema, por lo que es necesario evaluar las ganancias de las

antenas utilizadas, las pérdidas asociadas con la alimentación utilizada y los aspectos físicos como los conectores empleados, las pérdidas relativas al medio en el que se transmitirá la información, entre otros.

2.1.2.1. Presupuesto de enlace para redes LTE

De acuerdo al sitio LTE Encyclopedia, las consideraciones prácticas y valores típicos que se necesitan para estimar el presupuesto de enlace en una simulación para redes con tecnología de cuarta generación están dados de la forma siguiente:

Tabla V. **Valores típicos para estimación del presupuesto de enlace en redes LTE**

	Parámetro	Valor típico
a	Potencia de transmisión de estación base	43 – 48 dBm
b	Ganancia de la antena de la estación base	Depende del fabricante
c	Pérdidas por cable entre el conector de la antena	1 – 6 dB
d	UE RF <i>noise figure</i> .	6 – 11 dB
e	Ruido en la terminal calculado como: K (Constante de Boltzmann) x T (290K) x BW.	-104.5 dBm
f	SNR	-9 to -7 dB
g	Margen de interferencia debido al incremento en	3 – 8 dB

Continuación Tabla V.

h	Sobrecarga del control de canal	10 – 25 % = 0.4 – 1.0 dB
i	Ganancia UE de la antena.	Dependiente del fabricante

Fuente: elaboración propia.

2.1.3. Continuidad en cobertura

Este término se refiere al procedimiento empleado en la expansión de una red al añadirse nuevos sitios para mejorar la cobertura o la capacidad en una red telefónica. Para garantizar la calidad de servicio prestado previo a la expansión en la red, los sitios deben ponerse tomando las siguientes consideraciones:

- Posición: la posición debe ser elegida para que el sitio sea de fácil acceso y posea servicios básicos para establecer el radioenlace.
- Dimensionamiento de cobertura: debe hacerse un análisis para que exista coherencia con el área de cobertura anterior y para garantizar un nivel de potencia recibida por los terminales, lo suficientemente alto para los servicios que se quiera proveer.
- Dimensionamiento de capacidad: el hardware y software deben implementarse en el sitio de forma que pueda proveerse cobertura a la cantidad de usuarios planeada.
- Interferencia: debe analizarse las frecuencias a utilizar para poder reutilizar recursos sin causar interferencia con las celdas vecinas.

Inicialmente, no es posible garantizar la misma calidad en la cobertura. Sin embargo, es posible estudiar los parámetros de calidad en una red y realizar procedimientos de optimización que permitan planificar de mejor forma las redes o corregir problemas que surjan a partir de incorporación de nuevos usuarios o factores externos.

2.2. Planificación de capacidad

La capacidad de una red es referente al número de usuarios al que puede proveerse de servicios de forma simultánea. Cada sitio tiene capacidad para un determinado número de usuarios dependiendo de la tecnología empleada, por lo que debe hacerse una estimación del número de usuarios que se conectarán a cada sitio para mantener el nivel de calidad del servicio. Para planificar la capacidad de una red deben tomarse en cuenta los aspectos siguientes:

- Número de usuarios de voz y datos para el área de cobertura.
- El modelo de tráfico a emplearse.
- Debe calcularse el tráfico estimado para el área de cobertura.
- Calcular la cantidad de recursos necesarios para proveer servicio a la cantidad de usuarios planificada.

2.2.1. Modelo Erlang

El Erlang es una unidad que se emplea en la medición del volumen de tráfico en una red de telecomunicaciones. Si se tiene una tasa de llamadas entrantes “ λ ” y la duración promedio de una llamada está dada por “ h ”, entonces el tráfico “ A ” está dado (en Erlangs) por:

$$A = \lambda \cdot h \quad (2.2)$$

Esta medida de tráfico es adimensional y es de especial atención en el nivel de QoS de una red telefónica y la tarificación.

2.2.1.1. Modelo Erlang B

Este modelo se emplea para determinar el número de líneas que deben utilizarse en una red con tráfico conocido en la hora pico. La fórmula utilizada para este cálculo parte de la probabilidad de bloqueo o pérdida de una llamada debido a falta de líneas disponibles y asume que un usuario no realiza otra llamada inmediatamente al haber una llamada perdida. La probabilidad de que una llamada sea rechazada debido a falta de líneas disponibles está dada por:

$$P_t = B(N, A) = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{i=0}^N \frac{A^i}{i!}} \quad (2.3)$$

Donde:

P_t : probabilidad de rechazo o bloque de una llamada

N: número de recursos disponibles

A: la cantidad de tráfico expresada en Erlangs

2.2.1.2. Modelo Erlang B extendido

Este modelo parte del modelo Erlang B tomando en consideración, a diferencia de este, llamadas que al ser rechazadas se intentan nuevamente por un factor de repetición " R_f ".

En este caso, se considera una modificación al tráfico de la red generada por estas llamadas reintentadas, que se calcula de forma iterativa como:

$$A_{i*1} = A_0 + A \cdot P_t \cdot R_f \quad (2.4)$$

Donde:

A₀: tráfico inicial en la red

2.2.2. Dimensionamiento de un sistema celular

En la parte de voz el número de canales “C” que debe tenerse disponibles está dado por:

$$C = \frac{B}{\Delta f} \quad (2.5)$$

Donde:

B: recurso espectral disponible

Δf: ancho de banda de cada canal

Entonces el número de canales por celda “N” estará dado por:

$$N = \frac{C}{J} \quad (2.6)$$

Donde:

J: número de celdas

La intensidad de tráfico “A” para cada celda entonces está dada por:

$$A = B^{-1} (N - 1, P_t) \quad (2.7)$$

Donde:

N-1: es el número de canales de tráfico, reservando un canal para señalización que puede ser compartido debido a que el tráfico de señalización es bajo.

p: la probabilidad de bloqueo dada por la fórmula de Erlang B.

Dado los valores anteriores, el número de terminales móviles "m" es:

$$m = \frac{A}{a} \quad (2.8)$$

Donde el valor "a" es el tráfico generado por cada terminal móvil que está dado por:

$$a = \frac{HL}{3600} \quad (2.9)$$

Donde:

H: el tiempo de duración de una llamada dado en segundos

L: el número de llamadas realizadas cada hora

Asumiendo que el área de una celda "S_o" está dada por el área de un círculo de radio "r", la densidad superficial de tráfico de cada celda está dada por:

$$\rho_o = \frac{A}{S_o} \quad (2.10)$$

Si el sistema está compuesto por "J" celdas de igual tamaño entonces la superficie total estará dada por:

$$S_r = J \cdot S_o \quad (2.11)$$

Y el índice de reutilización (número total de racimos) del área de cobertura "S" estará dado por el valor entero inmediato inferior a:

$$Q = \frac{S}{JS_o} + 1 \quad (2.12)$$

Siendo así el número máximo de móviles al que puede proveérsele servicio:

$$M = Q \cdot J \cdot m \quad (2.13)$$

2.3. Planificación de frecuencia

La planificación de frecuencia es el proceso mediante el cual se asignan los recursos de radio y los parámetros de telecomunicaciones destinados a proveer servicio a un número determinado de usuarios en un área de cobertura.

Al planificar una red se procura maximizar la cantidad de información que pueda transmitirse y la eficiencia con la que esta se transmite, utilizando al máximo los recursos existentes. Por lo tanto, al realizar la asignación de las frecuencias a utilizar en una red telefónica, se procura reutilizar al máximo dichas frecuencias para garantizar la eficiencia espectral.

2.4. Parámetros de calidad en una red telefónica

En una red telefónica existen diferentes parámetros que se emplean para medir la calidad en la experiencia del usuario, relacionados con parámetros físicos de transmisión y recepción y eficiencia de procesos de servicio.

2.4.1. Calidad de servicio (*quality of service*)

La calidad de servicio (QoS) es una medida de la disponibilidad de una red y su capacidad para brindar acceso a los usuarios manteniendo ciertas

condiciones que permitan que el servicio sea óptimo. La importancia de la calidad de servicio radica en poder ofrecer servicios preferenciales a las aplicaciones que lo necesiten, asegurando cierto ancho de banda, tiempo de respuesta y la menor pérdida de datos posible.

La calidad de servicio también permite administrar la red de tal forma que se tenga mayor control sobre los recursos, lo que conlleva mejorar la experiencia del usuario y reducir los costos.

Para que la experiencia del usuario final posea el nivel adecuado de QoS es necesario evaluar diferentes aspectos que componen el rendimiento de la red telefónica. La accesibilidad de la red, la accesibilidad de los servicios y la integridad de los servicios son los componentes principales del rendimiento de la red que deben garantizarse junto con otros parámetros básicos, como el *throughput* y la latencia.

- *Throughput*: es la razón entre la cantidad de información que atraviesa de emisor a receptor en un sistema de comunicación y el tiempo que toma esta en completar el recorrido.
- Latencia: es el tiempo que tarda un paquete de datos en llegar de un extremo a otro en un sistema de comunicación.

2.4.2. Parámetros de señales en redes GSM, UMTS y LTE

En las tres generaciones de redes móviles existen algunos parámetros utilizados para medir la intensidad de las señales recibidas, los cuales son determinantes en la calidad del servicio. Los parámetros medidos por los equipos de usuario son:

- *RxLevel*: en redes GSM es el indicador del nivel de recepción de señales. Su valor en dBm expresa la potencia recibida por la terminal móvil.
- *RSCP (Received Signal Code Power)*: este indicador utilizado en redes UMTS denota la potencia medida por la terminal móvil receptora. Análogo al *RxLevel*, es el indicador del nivel de intensidad de señales recibidas y se utiliza como criterio para realizar los *handover*.
- *RSSI (Carrier Received Signal Strength Indicator)*: su valor expresa la potencia total de la portadora que incluye todas las componentes de frecuencia recibidas. Por lo tanto es un valor absoluto de potencia recibida que considera el ruido y la interferencia entre celdas vecinas. Este indicador es utilizado en redes UMTS y LTE.
- *RSRP (Reference Signal Received Power)*: al igual que los indicadores descritos previamente, este indicador es utilizado en redes LTE para expresar el nivel de intensidad de señales recibidas. Su valor comprende un promedio de todos los valores de potencia de los elementos que acarrean señales de referencia dentro de un ancho de banda determinado.

2.4.3. Accesibilidad de una red de voz/datos

La accesibilidad es referente a la capacidad de una red para proveer recursos a un usuario que accede a un servicio que puede ser tanto de voz como de datos. Para que una red pueda brindar un servicio óptimo, debe proveerse óptima cobertura y debe existir amplia disponibilidad en la red para establecer conexiones exitosas para los usuarios.

La medida de cobertura desde el punto de vista del usuario es el nivel de potencia recibida. Este parámetro indica la intensidad de la señal en decibeles percibida por el equipo de usuario. Este parámetro también depende de la

terminal móvil empleada y de la ubicación de la misma dentro del área de cobertura.

La disponibilidad de una red es la capacidad de realizar la conexión entre un usuario y un servicio. Para que pueda garantizarse esta disponibilidad debe tenerse la suficiente cantidad de canales disponibles aún en momentos en donde la red se encuentre congestionada y puede variar a su vez, por condiciones atmosféricas o interferencias que no se consideren en la planificación inicial de la red.

2.4.4. Accesibilidad e integridad de los servicios

La calidad de servicio (QoS) también abarca la disponibilidad o indisponibilidad de los servicios además de la disponibilidad de la red. Aún si una red puede proveer suficientes recursos para conectar a un usuario con determinado servicio, puede que dicha conexión no sea exitosa. Por lo tanto, algunos parámetros a considerar respecto a los servicios son:

- Disponibilidad de servicio: un servicio puede en algún momento no estar disponible debido a caídas de los servidores o congestión en los mismos, desactivación temporal o definitiva de un servicio, entre otros factores ajenos a la red de conexión.
- Caídas de servicio: una caída se refiere a la pérdida de acceso repentina a un servicio al que se encuentra conectado un usuario que no desea desconectarse y que se encuentra dentro del área de cobertura de la red.
- *RxQual*: es un número entero entre 0 y 7 que expresa la calidad de la señal vocal.
- *Bit Error Rate (BER)*: es la razón entre la cantidad de bits erróneos y la cantidad total de bits recibidos. Es una forma de medir la calidad en la

transmisión de datos. Mientras menor sea el BER, mayor es la calidad con la que se transmite.

- Tiempo de navegación: es el tiempo que tarda un usuario en alcanzar el estado deseado en un servicio desde que realiza una petición de acceso.
- RSRQ (*Reference Signal Received Quality*): en redes LTE es un indicador de la calidad de señal recibida que depende del número de bloques de recursos, el RSRP y el RSSI.
- SNR (*Signal to Noise Ratio*): este valor es una medida de la relación que existe entre la potencia recibida de señales deseadas que acarrean información de importancia para la comunicación en la red, con respecto a señales de ruido no deseadas que afectan la comunicación.

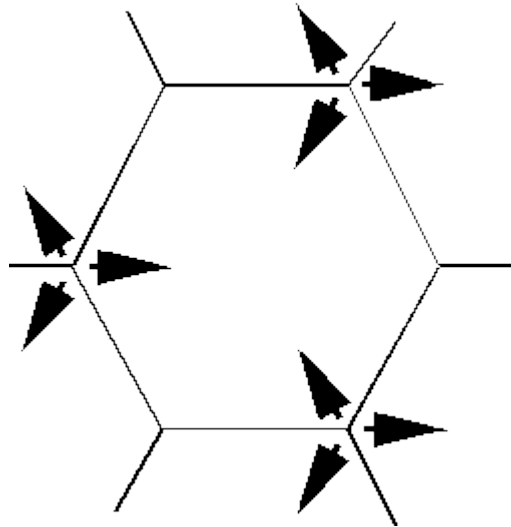
3. DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE MEJORA DE COBERTURA Y TÉCNICA DE RECOPIACIÓN DE DATOS DE CAMPO

3.1. Sectorización

La sectorización consiste en dividir el área irradiada por una antena en determinado número de partes iguales, reemplazando la antena omnidireccional de la estación base por antenas direccionales dedicadas a cubrir cada una un sector. Lo más común es dividir la celda en 3 ó 6 sectores de 120° o 60°, respectivamente.

Mediante este proceso puede aumentarse el número de canales disponibles sin aumentar el número de sitios desplegados, aumentando la capacidad de la red. Sin embargo, este método presenta algunas desventajas, ya que debe realizarse reasignación de recursos dentro de una misma celda al cambiar de sector y no es posible ofrecer la misma cantidad de recursos iniciales por cada sector en el que se dividen.

Figura 24. **Sectorización de tres sectores**



Fuente: *Cell sectorization.*

<http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr04/cellplan/sector.htm>. Consulta: 7 de febrero de 2018.

3.2. **División celular (*cell splitting*)**

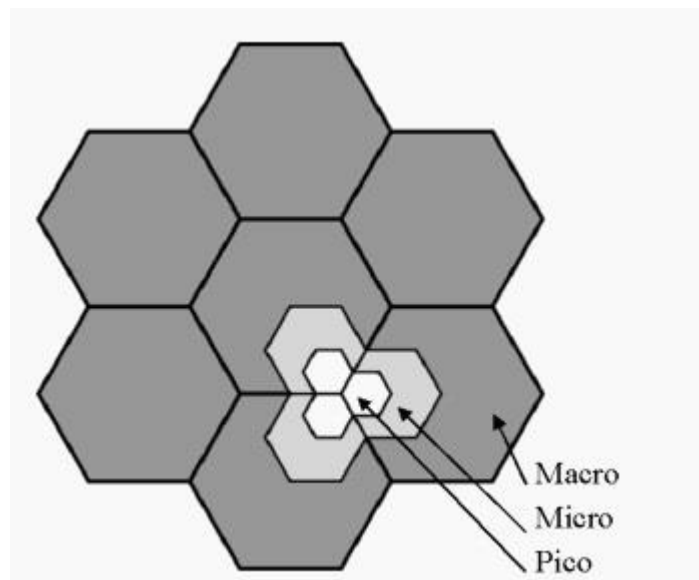
La división celular consiste en dividir una celda en celdas de menor tamaño, con el fin de poder manejar mayor cantidad de tráfico y aumentar el nivel de potencia recibida por las terminales móviles, teniendo antenas dedicadas con diferentes características para cada tipo y tamaño de celda.

3.2.1. **Clasificación de celdas por su tamaño**

- Macrocelda (radio entre 1,5 y 20 km): utilizadas normalmente en áreas rurales o áreas con pocos obstáculos, poca densidad poblacional y tráfico moderado.
- Minicelda (radio entre 0,5 y 1,5 km): empleadas en áreas urbanas con tráfico moderado.

- Microcelda (radio entre 0,2 y 0,5 km): celdas especiales para áreas urbanas con alta densidad poblacional (centros comerciales, estadios, complejos de vivienda, entre otros).
- Picocelda (radio menor a 200 m): celdas auxiliares que se utilizan para manejar el tráfico generalmente de espacios cerrados, mejorando la atenuación producida por los materiales en espacios *indoor* y mejorando la calidad del servicio en oficinas, pequeños edificios o algunos pisos de grandes edificios, auditorios, entre otros.

Figura 25. **Tipos de celdas**



Fuente: *Cell splitting – Mobile computing*. <http://www.itportal.in/2012/11/cell-splitting-mobile-computing-be.html>. Consulta: 7 de febrero de 2018.

Realizar división de celdas permite ofrecer más canales disponibles y a su vez reutilizar de manera eficiente los canales. Sin embargo, al generar nuevas celdas a partir de un sistema existente debe realizarse de nuevo la planificación de frecuencias y tomar en cuenta la interferencia co-canal que existe dentro de la red, así como los cambios de celda o *handover*, que son más frecuentes debido al aumento en el número de celdas.

3.3. Ajustes en parámetros de antenas

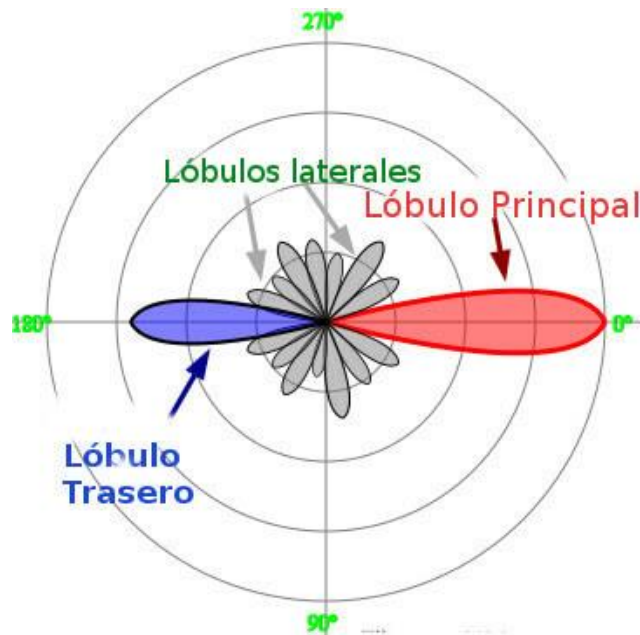
Otra forma de ajustar la cobertura en una celda es modificando los parámetros propuestos en la antena de la estación base. Para corregir diferentes aspectos puede modificarse la altura de la antena, el *azimuth* (ángulo que se mueve respecto al eje de la antena) y el *tilt* (ángulo medido desde el horizonte de la antena).

Previo a describir las modificaciones en los parámetros de la antena, es necesario describir con brevedad el patrón de radiación para exponer de forma clara los cambios en el mismo, con cada cambio que se realice en alguno de los parámetros expuestos con anterioridad.

3.3.1. Patrón de radiación de una antena

El patrón de radiación de una antena es una representación gráfica de la distribución de la energía irradiada en función de la dirección. Su importancia radica en establecer las direcciones en las que se irradia al máximo, las cuales forman porciones de radiación que se denominan lóbulos. Entre los lóbulos se encuentra el lóbulo principal, que es el de mayor tamaño, y los secundarios o laterales, que son de menor tamaño al principal. Además existe un lóbulo posterior, que es el lóbulo secundario que está en dirección opuesta al lóbulo principal.

Figura 26. **Patrón de radiación de una antena**

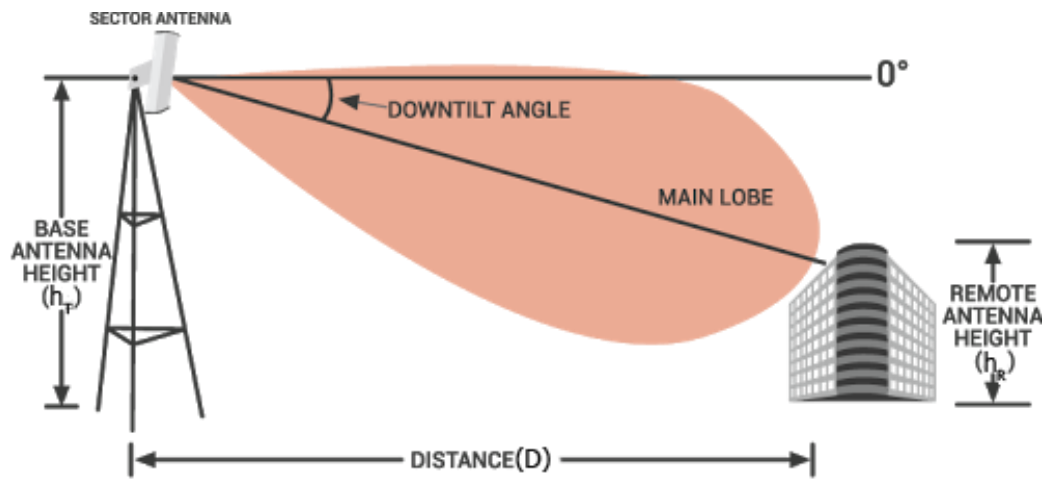


Fuente: *Parámetros básicos de antenas*. <https://www.tecnologia-informatica.es/principios-basicos-de-antenas>. Consulta: 23 de enero de 2018.

3.3.2. **Modificación del tilt de la antena**

El *tilt* es el ángulo que representa la inclinación del lóbulo superior del patrón de radiación de la antena respecto la horizontal. Este ángulo se modifica para mejorar la cobertura y reducir interferencia. Puede ser modificado de forma mecánica y eléctrica.

Figura 27. **Tilt de una antena**



Fuente: *Antenna downtilt and coverage calculator*.

<https://www.allaboutcircuits.com/tools/antenna-downtilt-and-coverage-calculator>. Consulta: 7 de febrero de 2018.

3.3.2.1. Cálculo del *tilt* de una antena

El cálculo del *tilt* o *downtilt* es de especial importancia en la planificación de una red y en la optimización de los parámetros de una antena. El valor de este ángulo depende de la altura de las antenas que cumplen el papel de emisor y receptor y de la distancia que existe entre ellas (ver figura 27). La fórmula empleada en el cálculo del ángulo de inclinación del lóbulo superior está dada por:

$$\text{DownTilt Angle} = \tan^{-1}\left(\frac{H_e - H_r}{D}\right) \quad (3.1)$$

Donde:

H_e : altura de la antena emisora

H_r : altura de la antena receptora

D: distancia entre emisor y receptor

3.3.2.2. Modificación mecánica del *tilt*

Modificar este ángulo de forma mecánica representa hacer una alteración física en la posición de la antena mediante accesorios utilizados en su instalación. Es la forma más simple de modificación, sin embargo, se limita su aplicación debido a que se alteran algunos otros parámetros de la antena como el FBR (*Front to Back Ratio*) que describe la potencia irradiada en la dirección deseada de radiación y la dirección opuesta, aumentando la posibilidad de interferencia con otras celdas.

3.3.2.3. Modificación eléctrica del *tilt*

Contrario a la modificación mecánica, para modificar el ángulo de inclinación eléctricamente no es necesario alterar físicamente la antena de ninguna forma y además presenta la opción de tener un *tilt* variable, que pueda alterarse conforme las necesidades se presenten sin mayor dificultad. La modificación eléctrica consiste en cambiar la fase de los elementos de la antena de forma simultánea, haciendo que la señal pueda distribuirse uniformemente en una superficie circular que se encuentra a una altura por debajo de la irradiada originalmente.

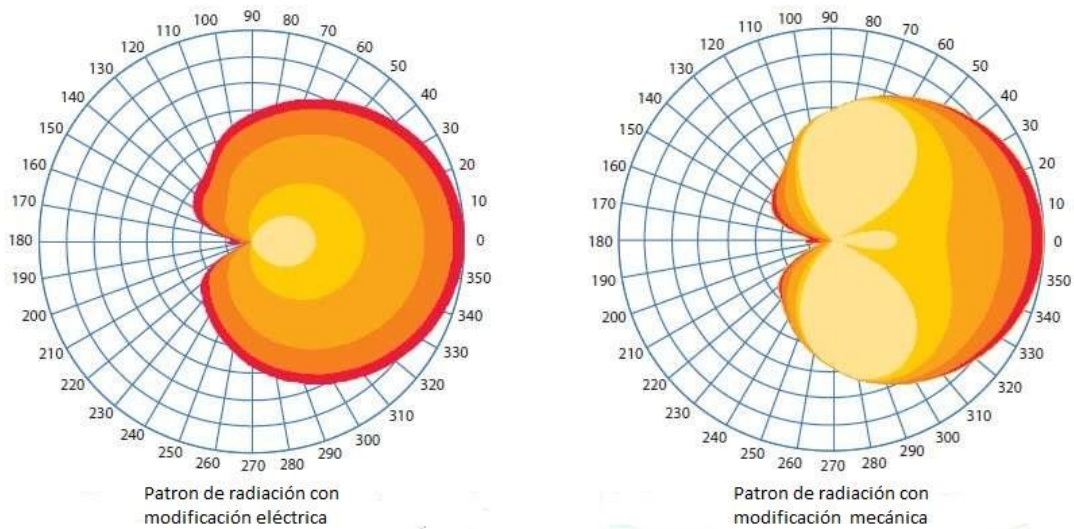
3.3.2.4. Principales diferencias entre la modificación mecánica y la modificación eléctrica del *tilt*

Ambos métodos de modificación son empleados para mejorar la cobertura brindada por una antena en una celda. Sin embargo, debe evaluarse las condiciones actuales del área de cobertura y la cantidad de recursos disponibles que pueden emplearse en la mejora de la cobertura para

seleccionar el método a emplearse. Alterar de forma mecánica el *tilt* es conveniente en sitios muy altos en donde la inclinación no es lo suficientemente grande. La superficie de cobertura no es completamente uniforme y, al ser alterado el FBR de la antena, se incrementan los traslapes entre sectores.

Por otro lado, la alteración eléctrica produce una superficie irradiada uniforme sin aumentar la cantidad de traslapes existentes. Sin embargo, la superficie irradiada decrece en tamaño conforme la altura de la antena respecto a la superficie irradiada aumenta, por lo que disminuye la cobertura a grandes alturas. De igual forma, modificar de forma eléctrica el *tilt* constituye un costo mayor a su contraparte mecánica, debido a que se requiere equipo más sofisticado que permita alterar la fase de cada elemento de la antena.

Figura 28. Patrón de radiación con alteración del *tilt*



Fuente: *Antenna mechanical tilt vs Electrical tilt*. <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/antenna-mechanical-tilt-vs-electrical-tilt.html>. Consulta: 23 de enero de 2018.

En el patrón de radiación puede observarse claramente que al alterar el *tilt* eléctricamente, no aparecen lóbulos secundarios y se reduce el área de cobertura uniformemente, mientras que al alterarlo de forma mecánica se reduce la cobertura frontal y aumenta considerablemente la cobertura lateral, formando superficies con menor uniformidad.

3.3.3. Modificación del *azimuth* de la antena

Esta modificación consiste en rotar la antena alrededor de un eje perpendicular al área irradiada. Por lo tanto, un cambio en este ángulo produce un cambio en la dirección de radiación máxima.

Un cambio en el *azimuth* se realiza cuando se desea controlar los traslapes entre sectores y reducir la interferencia entre canales. El *azimuth* es

de especial atención en las antenas direccionales, ya que en las antenas omnidireccionales un cambio en este ángulo no produce efectos sobre la cobertura.

3.3.4. Cambio en la altura de la antena

La altura de una antena es otro parámetro que puede modificarse para disminuir los efectos de la interferencia y aumentar o reducir el área de cobertura.

3.4. Recopilación de datos de campo por medio de drive test

En una red telefónica puede supervisarse el área de cobertura por medio de pruebas de campo o *drive test*, que tienen como objetivo medir los parámetros relevantes a la calidad de servicio para proporcionar información acerca del estado del servicio, pudiendo de esta forma realizar acciones correctivas sobre problemas existentes.

Esta prueba puede utilizarse para hacer un estudio antes de desplegar una red, para optimizar los parámetros y recursos de una red existente, como la cobertura y la calidad de servicio, e incluso para realizar comparaciones entre operadores de telecomunicaciones en un área determinada.

3.4.1. Elementos principales de un *drive test*

Para realizar mediciones con esta técnica es necesario tomar en cuenta algunos detalles que permitan recopilar, procesar y analizar los datos requeridos. Los principales elementos a considerar son:

- Ruta: debe planificarse la ruta que se utilizará para cubrir el área en la cual quiera realizarse la prueba de campo.
- Terminal móvil: debe contarse con una terminal móvil capaz de interactuar con la red que permita recopilar datos de la tecnología deseada. Puede realizarse una prueba de campo con un teléfono celular que cuente con compatibilidad con la tecnología móvil 4G y a su vez con sus predecesoras.
- Listado de parámetros: es necesario definir los parámetros de interés que se estará monitoreando durante la prueba. Estos parámetros incluyen el RxLev, RxQual, las celdas vecinas, entre otros.
- Sistema de almacenamiento de archivos: los datos medidos deben ser registrados en archivos para su análisis posterior. Debe contarse con espacio suficiente en la terminal móvil para almacenar todos los archivos que serán generados a partir de las mediciones.
- Herramientas de procesamiento: posterior a la medición, debe utilizarse software que permita visualizar los datos, aplicarles formato y cualquier otro proceso necesario para poder analizar todos los valores capturados.

3.4.2. Tipos de *drive test*

Este tipo de pruebas se realizan con diferentes propósitos y pueden ser clasificados en distintos tipos conforme al objetivo que conlleva la medición.

3.4.2.1. Análisis de rendimiento

Este es el tipo de *drive test* más común y el que se realiza con mayor frecuencia. Se utiliza para verificar el desempeño de una red con el fin de mantener condiciones que permitan satisfacer a los usuarios.

Por medio de este tipo de pruebas puede identificarse discontinuidades en la cobertura, fallas en el servicio de llamadas o datos y puede analizarse el tráfico manejado por los sitios desplegados, así como verificar que se cuente con la cantidad de recursos necesarios.

3.4.2.2. Benchmarking

Benchmarking es un término referente a la comparación entre los servicios que ofrecen diferentes proveedores de servicio. Por medio de una prueba de campo puede realizarse una comparación de la cobertura y la calidad de servicio que ofrecen distintas empresas de telecomunicaciones.

3.4.2.3. Optimización y solución de problemas

Este tipo de prueba se realiza normalmente cuando se reportan fallas en el sistema. Se utiliza para determinar el tipo de medidas correctivas que permitan restablecer la red a su funcionamiento regular.

Otra aplicación de estas pruebas consiste en evaluar el estado de una red al momento de buscar la implementación de nuevas tecnologías o nuevos métodos de mejora que permitan brindar un mejor servicio al usuario final.

4. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SERVICIO EN EL CAMPUS UNIVERSITARIO

La metodología empleada para la recopilación de datos es la prueba de campo o *drive test*, utilizando para ello diferentes elementos de hardware y software para generar los mapas de cobertura y velocidad de carga y descarga.

4.1. Hardware

Se utilizó un dispositivo móvil de gama media, con la finalidad de realizar mediciones congruentes con las terminales móviles utilizadas mayormente por su asequibilidad y versatilidad. Se obtuvo los datos de cobertura de segunda y tercera generación forzando al dispositivo a interactuar con cada una de las tecnologías y los datos de tecnologías de cuarta generación, liberando la restricción para interactuar con la red como se haría normalmente, navegando con conectividad LTE sujeta a disponibilidad.

4.1.1. Terminal empleado

- Marca: Motorola
- Modelo: Moto G5 Plus.
- Sistema Operativo: Android 7.0 (Nougat).
- Tecnologías móviles compatibles: GSM (850, 900, 1800, 1900), HSDPA (850, 900, 1900, 2100), LTE (1(2100), 2(1900), 3(1800), 4(1700/2100), 5(850), 7(2600), 8(900), 18(800), 19(800), 26(850), 28(700), 38(2600), 41(2500)).
- Precisión del GPS: 2 metros.

- LTE, Categoría 4.

4.2. Software

Se utilizó dos herramientas para la recopilación de datos de cobertura y de velocidad de transferencia de datos. La herramienta utilizada para recopilar la información de los datos de cobertura fue el programa G-Net Track Lite y la herramienta empleada para las pruebas de velocidad de carga y descarga fue la aplicación nPerf.

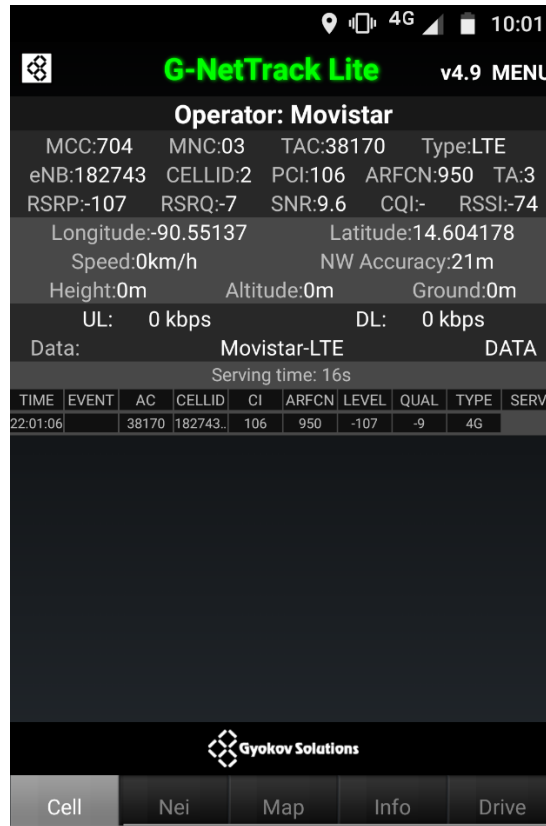
4.2.1. G-Net Track Lite v4.9

Este programa es un monitor de red y herramienta para *drive test* compatible con las tecnologías GSM/UMTS/CDMA/LTE utilizado para recopilar información desde cualquier terminal móvil. Permite conocer diversos parámetros de calidad correspondientes a cada tecnología, entre los cuales puede mencionarse:

- 2G: RxLevel, RxQual, BSIC.
- 3G: RSCP, ECNO, PSC.
- 4G: RSRP, RSRQ, PCI.

G-Net Track Lite posee una interfaz intuitiva y funcional, consta de varias pestañas que proveen diferente información. La primera pestaña, *Cell*, es la pestaña principal y consta de un resumen que abarca el operador de la red móvil, el tipo de red al que se encuentra conectado (GSM, UMTS, HSPA, LTE), el identificador de la celda, las celdas vecinas y los parámetros mencionados con anterioridad para cada tecnología, entre otros.

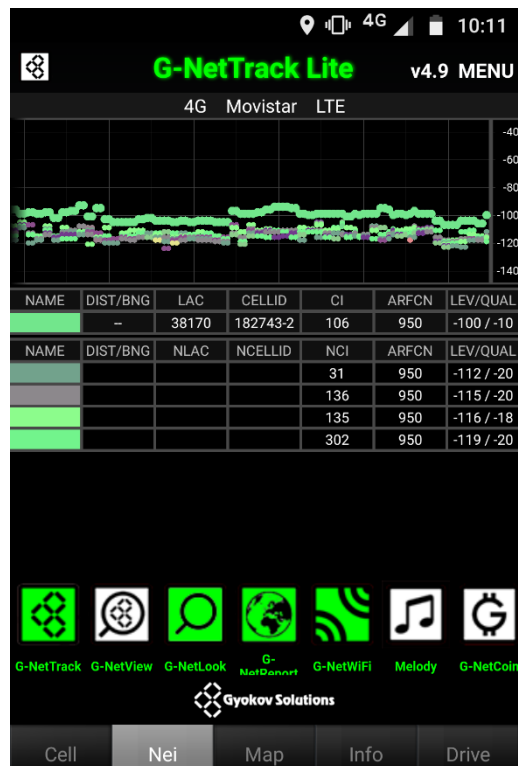
Figura 29. Pestaña principal (Cell)



Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla de la aplicación móvil G-Net Track Lite v4.9.

Las demás pestañas en su mayoría presentan con mayor detalle los parámetros que se encuentran resumidos en la pestaña principal. Adicional a esto, el programa contiene una pestaña en la que se muestra un mapa que es una previsualización del mapa de cobertura que se genera al desplazarse con la aplicación activa.

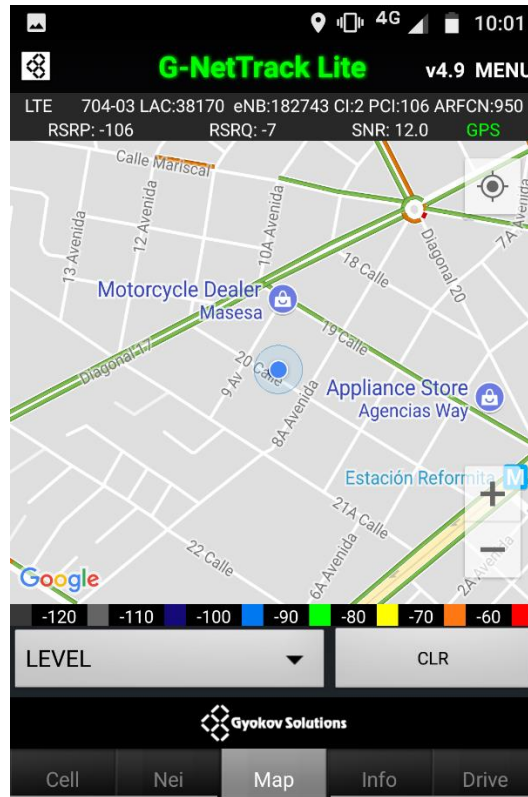
Figura 30. Pestaña de información de celdas vecinas (*Nei*)



Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla de la aplicación móvil G-Net Track Lite v4.9.

La pestaña *Nei* muestra información de las celdas vecinas y de la celda a la que se encuentra conectada la terminal móvil.

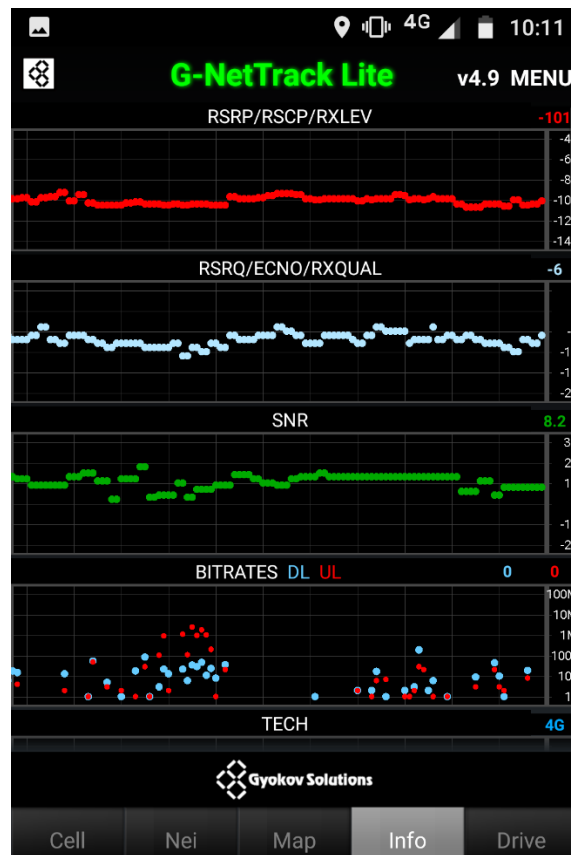
Figura 31. Pestaña de mapa (*Map*)



Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla de la aplicación móvil G-Net Track Lite v4.9.

Esta pestaña muestra una vista geográfica de las medidas realizadas e información sobre la tecnología que provee la red y el sistema de posicionamiento de la terminal móvil.

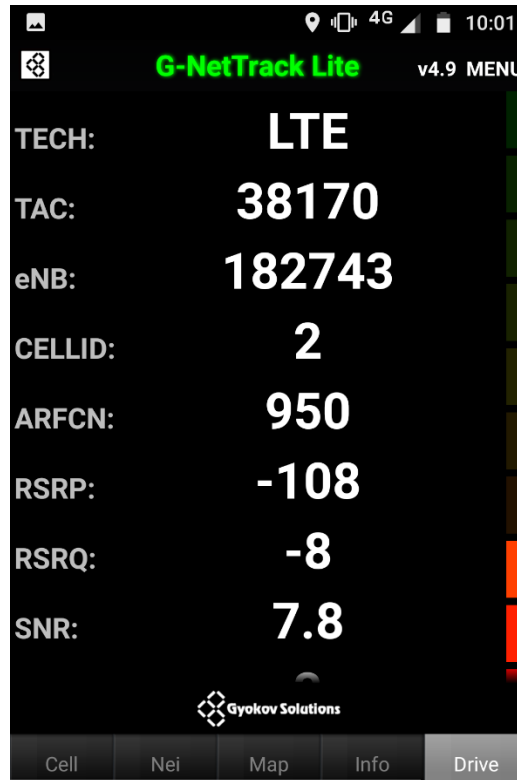
Figura 32. Pestaña de información de la conexión (*Info*)



Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla de la aplicación móvil G-Net Track Lite v4.9.

La pestaña *Info* muestra de forma gráfica los valores actuales y pasados de los niveles recibidos, la calidad, la relación señal a ruido (sujeto a la tecnología y las tasas de transferencia de bits).

Figura 33. Pestaña de drive test (*Drive*)



Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla de la aplicación móvil G-Net Track Lite v4.9.

Por último, la pestaña *drive*, de forma similar a la pestaña principal, muestra de forma resumida los principales parámetros relativos a la conexión. El tipo de tecnología, el identificador de la celda, los niveles recibidos, entre otros. Esta pestaña es de especial utilidad cuando se realiza un *drive test*, ya que permite tener a la vista los parámetros que están siendo registrados.

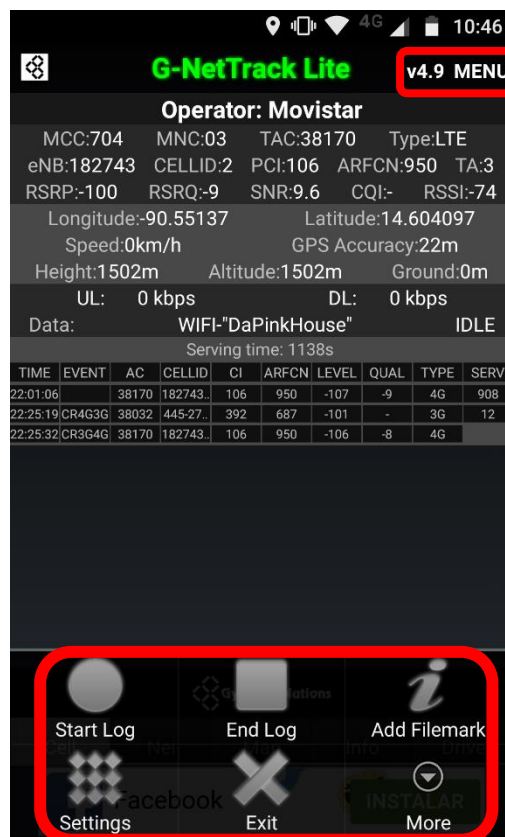
4.2.1.1. Recopilación de datos en G-Net Track Lite v4.9

En este programa existe la opción de realizar un registro de datos y exportarlos a un archivo de extensión KML (*Keyhole Markup Language*). Estos archivos son una variación de un archivo XML que permite almacenar

localizaciones y realizar anotaciones geográficas, pudiendo ser visualizadas, en este caso, utilizando la herramienta de software Google Earth.

G-Net Track Lite cuenta con un menú de fácil acceso en el que se presentan las opciones de iniciar un registro o *log*, detenerlo y fijar las opciones para el archivo que será generado, entre otras opciones.

Figura 34. Menú de G-Net Track Lite v4.9

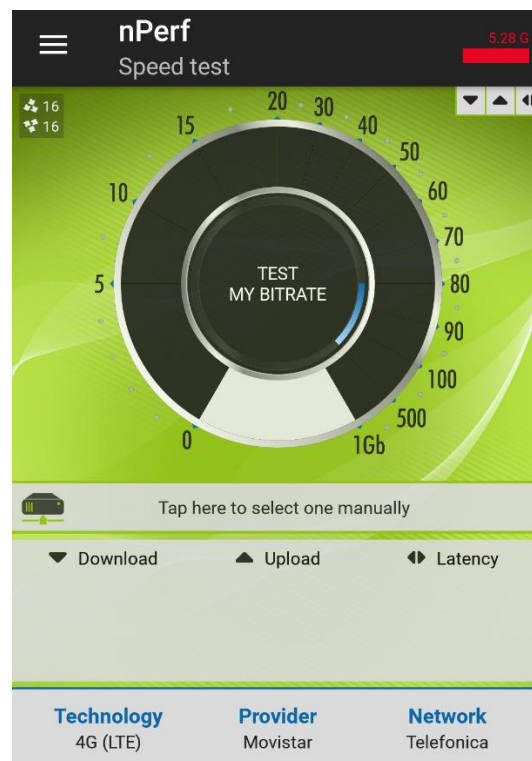


Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla de la aplicación móvil G-Net Track Lite v4.9.

4.2.2. nPerf

nPerf es una aplicación para sistema operativo Android diseñada para caracterizar la calidad de una conexión a Internet. Por medio de más de 350 servidores que en conjunto ofrecen un ancho de banda superior a 1Tb/s, permite encontrar la mejor conexión para realizar pruebas de tasa promedio de transferencia de bits (*bitrate*), pruebas de latencia, navegación, *streaming* de video y ofrece un puntaje que indica el nivel de desempeño de la red, compuesto por puntajes individuales asignados a cada prueba.

Figura 35. Pestaña principal de nPerf



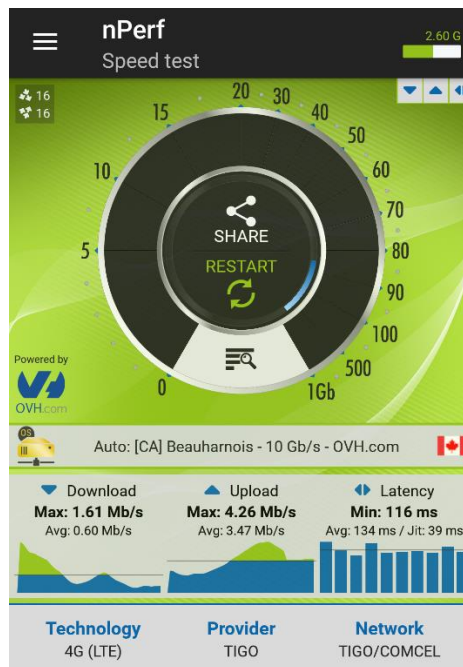
Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla de la aplicación móvil nPerf.

4.2.2.1. Prueba de *bitrate*

La prueba de *bitrate* consiste en la descarga de archivos binarios con múltiples conexiones simultáneas utilizadas para saturar la conexión durante la prueba. Este proceso entrega un valor máximo que se calcula como el promedio del 30 % de los valores máximos de descarga y el 50 % de los valores máximos de carga. De igual forma, nPerf arroja un valor promedio de carga y descarga que se calcula excluyendo el 5 % de los valores más altos y el 5 % de los valores más bajos registrados.

Para iniciar una prueba, únicamente es necesario pulsar en la pantalla, en la pestaña principal (ver figura 35) el botón que contiene el texto: *TEST MY BIRTRATE*. Inmediatamente se solicita la conexión a un servidor disponible y se inicia la prueba. Pasado el tiempo de la prueba, se presentan los resultados junto con la opción de iniciar nuevamente una prueba y el servidor utilizado para la descarga de paquetes, como se muestra en la figura a continuación:

Figura 36. Resultados de una prueba de *bitrate* en nPerf



Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla de la aplicación móvil nPerf.

4.3. Mapas de cobertura

El análisis de la cobertura se realizó para las tres empresas líderes en telefonía en Guatemala: Tigo, Claro y Movistar. Para cada compañía se realizó el mapa de cobertura de cada tecnología móvil (2G, 3G, 4G). Se registró la intensidad de la señal recibida en la terminal móvil, siendo esta mayor mientras mayor es el valor en decibeles que se registra en cada uno de los puntos que conforman cada mapa de cobertura.

4.3.1. Mapas de cobertura para tecnología de segunda generación

Para estos mapas de cobertura los colores utilizados en los puntos están colocados conforme a la intensidad de la señal, siendo estos codificados utilizando los estándares GSM de la forma siguiente:

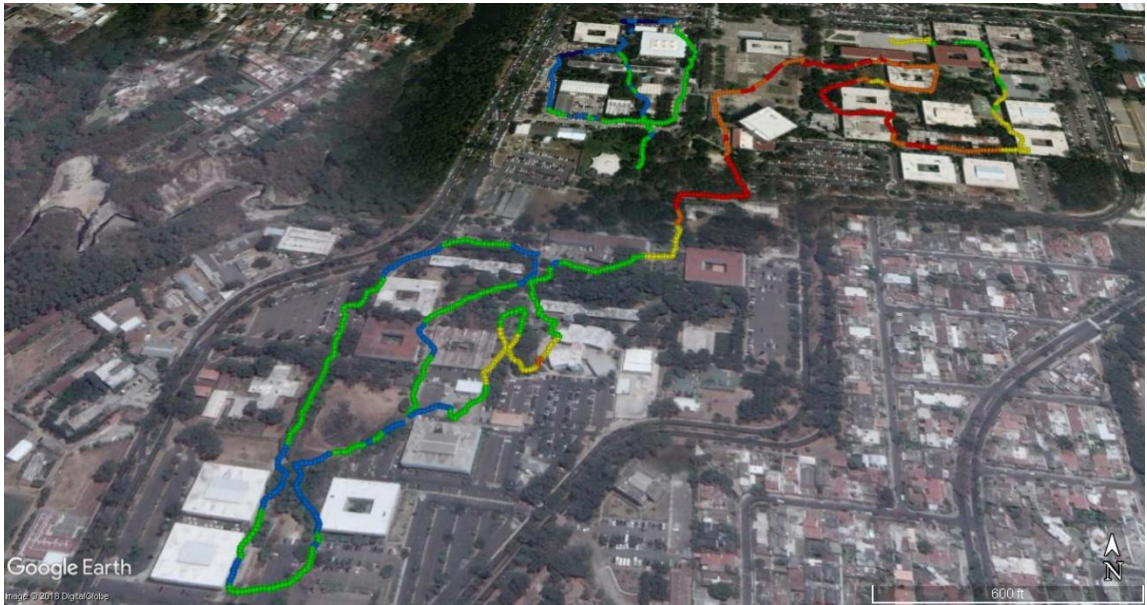
Tabla VI. **Codificación de colores para mapas de cobertura en 2G**

Color	Rango de Intensidad
Rojo	>-60 dB
Anaranjado	-60 dB $<$
Amarillo	-70 dB $<$
Verde	-80 dB $<$
Azul	-90 dB $<$

Fuente: elaboración propia.

En la tabla se muestran los rangos de intensidad de la potencia recibida, medida por medio de la terminal móvil utilizando la escala logarítmica en decibeles, teniendo valores en un rango extenso que va por debajo de los -90 dB y por encima de los -60 dB, teniendo en estos límites los colores rojo y azul, respectivamente, siendo el color rojo el indicador de la mejor calidad de señal y el azul de la menor.

Figura 37. Mapa de cobertura para Claro



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Figura 38. Mapa de cobertura para Tigo



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Figura 39. **Mapa de cobertura para Movistar**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Respecto a los mapas de cobertura para tecnología de segunda generación, no existen puntos en donde se pierda la conectividad para interactuar con la red. En todo el proceso de medición se tuvo para todas las tecnologías conectividad con tecnología EDGE sin cambios hacia GPRS y GSM, lo cual garantiza la integridad de la conexión, siendo esta la mejor posible en el contexto tecnológico de 2G. Por lo tanto, debería ser posible realizar una llamada y enviar mensajes de texto en cualquier parte del *campus*, así como utilizar el resto de servicios proveídos en 2G sin ningún problema.

Estos mapas no proveen mucha información respecto al estado actual de la cobertura, debido a que la tecnología de segunda generación es poco utilizada actualmente en comparación a sus predecesoras de tercera y cuarta generación. Sin embargo, es importante que exista una contingencia al momento de no estar disponibles las tecnologías ahora empleadas para garantizar la comunicación en algún nivel.

En comparación, la compañía cuya señal se distribuye de forma más uniforme es Tigo, ya que los valores medidos se encuentran dentro de un rango estrecho. Sin embargo, los valores medidos van por debajo de los -80 dB cuando se espera que sean más altos. Claro presenta una cobertura similar a la antes descrita, con la excepción de una notoria mejoría respecto al mapa de Tigo en los alrededores de la Facultad de Derecho, la Biblioteca Central y la Plaza de los Mártires, en donde se superan los -60 dB. Por otro lado, Movistar presenta una distribución de cobertura más favorable, ya que no se registraron valores por debajo de los -90 dB y la mayor parte de valores se encuentra por encima de los -80 Db, contrario a lo ocurrido en los mapas de cobertura de las otras compañías.

4.3.1. Mapas de cobertura para tecnología de tercera generación

Al igual que en los mapas descritos anteriormente, los colores utilizados en los puntos están dispuestos conforme a la intensidad de la señal respetando los estándares UMTS, siendo estos codificados de la forma siguiente:

Tabla VII. **Codificación de colores para mapas de cobertura en 3G**

Color	Rango de Intensidad
Rojo	>-60 dB
Anaranjado	<-60 dB
Amarillo	<-70 dB
Verde	<-80 dB
Azul	<-90 dB
Azul Oscuro	<-100 dB

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Mapa de cobertura para Claro**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Figura 41. **Mapa de cobertura para Tigo**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Figura 42. **Mapa de cobertura para Movistar**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

En las imágenes se muestra la distribución de la cobertura para tecnologías de tercera generación (UMTS), para las tres compañías proveedoras de servicios líderes en el país. El mapa de cobertura indica que no existen puntos en donde se realice forzosamente un cambio de tecnología a GSM o *handoff* por falta de cobertura.

Contrario a la cobertura en 2G, estos mapas brindan una perspectiva más amplia del estado de la red, debido a que en Guatemala actualmente aún se utiliza un número considerable de teléfonos celulares que no poseen conectividad LTE, siendo 3G la tecnología empleada en la carga y descarga de paquetes de datos. Por lo tanto, estos mapas tienen ya un impacto en las velocidades de carga y descarga que será mayor conforme más alta sea la intensidad que pueda ser recibida por la terminal móvil en una posición determinada dentro de la zona de cobertura.

Para el mapa de Claro se determinó que la intensidad de la señal es variada a lo largo del *campus*, siendo esta menor en la región sur y las instalaciones de la Facultad de Ingeniería. Sin embargo, existen pocos puntos que están por debajo de los -90 db, por lo que es posible mantener la conectividad 3G.

En Movistar, la señal tiene una intensidad baja en la región sur del *campus* y tiene máximos en el área de Biblioteca Central y la Plaza de los Mártires, principalmente. En la región sur, la mayor parte de mediciones de intensidad se registraron por debajo de los -90 dB, por lo que la integridad de la conectividad se ve comprometida en el sector.

Para Tigo, la intensidad de la señal es alta y uniforme a lo largo del *campus*. Se registraron muy pocos valores por debajo de los -90 dB cerca del edificio M3 y la mayor cantidad de valores se encuentra por encima de los -60 dB, lo que garantiza la conectividad con buena cobertura y alta intensidad de señal a lo largo del *campus*.

En comparación, Tigo ofrece la mejor cobertura 3G en el *campus*, mientras que Movistar ofrece buena cobertura únicamente en la región norte del mismo, siendo su cobertura en la región sur la que presenta menores valores de intensidad de señal, y Claro, similar a Movistar, tiene sus máximos en la región norte concentrados en el área de la Plaza de los Mártires y, a diferencia de Movistar, presenta baja cobertura en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería.

La cobertura en 3G en el *campus* universitario es muy buena por parte de Tigo, sin embargo, en las otras compañías analizadas la intensidad de la señal no es constante y tiene valores bajos en la mayor parte del *campus*. Por lo

tanto, la cobertura en el *campus* debe mejorarse para servir a la gran cantidad de usuarios que hacen uso de la red.

4.3.1. Mapas de cobertura para tecnología de cuarta generación

Similar a los mapas para tecnologías de segunda y tercera generación, los niveles que corresponden a cada rango de intensidad (RSPR) de señales están dispuestos de la forma siguiente:

Tabla VIII. **Codificación de colores para mapas de cobertura en 4G**

Color	Rango de Intensidad
Rojo	>-60 dB
Anaranjado	<-60 dB
Amarillo	<-70 dB
Verde	<-80 dB
Azul	<-90 dB
Azul Oscuro	<-100 dB
Gris	<-110 dB
Gris Oscuro	<-120 dB

Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Mapa de cobertura para Claro**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Figura 44. **Mapa de cobertura para Tigo**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Figura 45. Mapa de cobertura para Movistar



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

En las imágenes se muestran los mapas de cobertura para tecnologías de cuarta generación (LTE). Estos mapas merecen especial atención debido a que muestran el estado actual de la cobertura para un usuario típico con una terminal móvil compatible con todas las tecnologías empleadas actualmente.

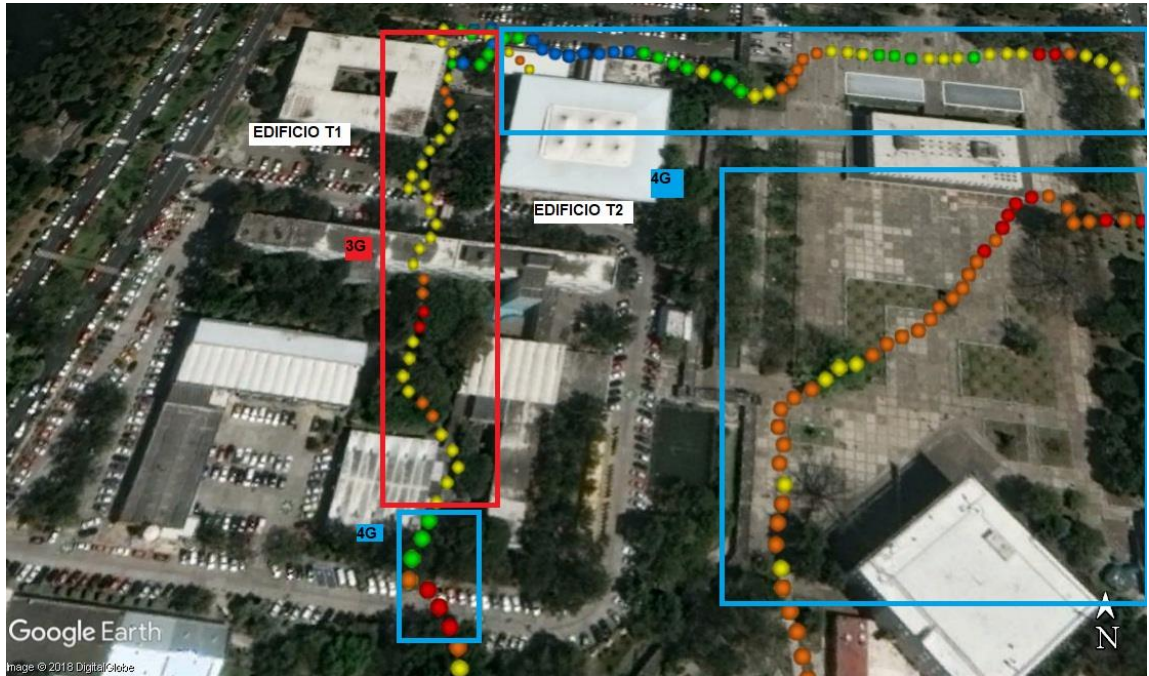
Para la compañía Tigo, la intensidad de la señal es débil en la región sur del *campus*, registrando valores de RSPR por debajo de los -80 dB en todas las instalaciones de las facultades de Ciencias Químicas y Farmacia y Ciencias Económicas. Esto implica que existe una alta probabilidad de incurrir en un *handoff* forzado hacia UMTS, teniendo esto un impacto principalmente en las velocidades máximas de subida y bajada que pueden alcanzarse, comprometiendo la experiencia del usuario. En la región norte de la universidad la cobertura brindada no es uniforme, sin embargo, existen muy pocos puntos en donde la intensidad de la señal se registró por debajo de los -80, siendo esto lo suficientemente bueno para mantenerse interactuando con la red por medio

de conectividad LTE con lugar para mejoras, en especial en los alrededores de las facultades de Odontología y Derecho, en donde la cobertura es escasa.

Respecto a la cobertura brindada por las compañías Claro y Tigo, cabe resaltar que existen puntos señalados en los mapas de cobertura en donde la intensidad de la señal recibida no fue lo suficientemente alta para mantener conectividad LTE y existió un *handoff* hacia UMTS, por lo que puede tomarse estas mediciones como puntos sin cobertura LTE en el *campus*.

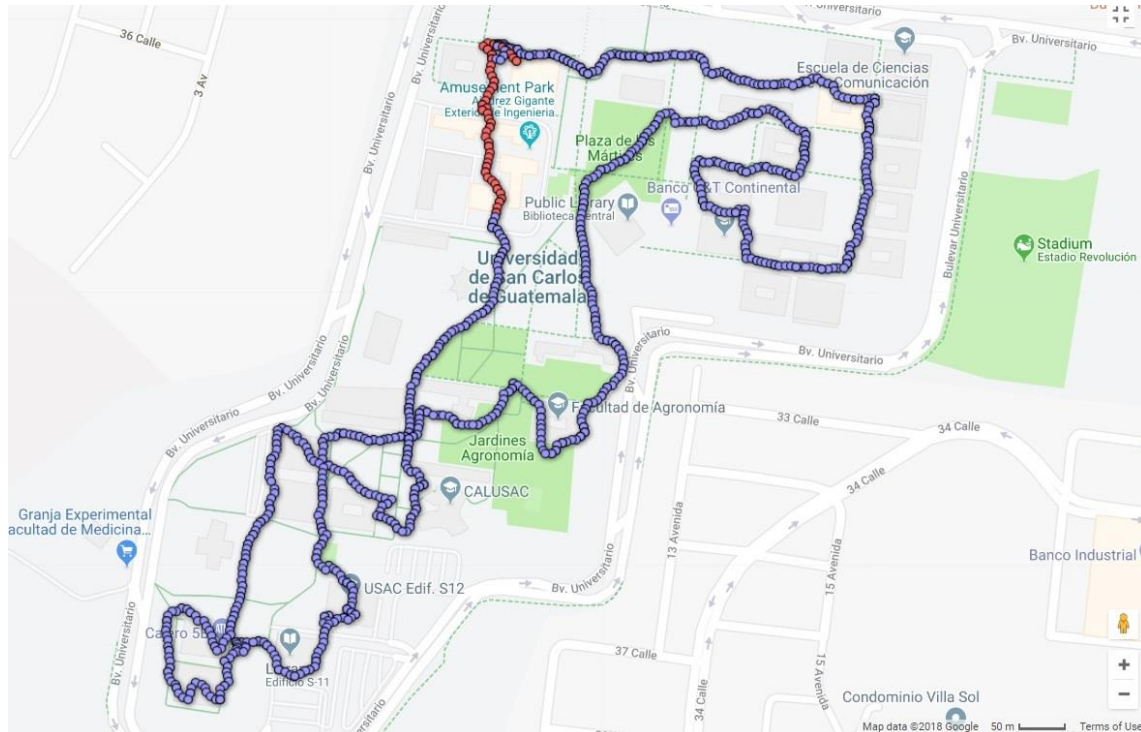
Para Claro, la intensidad de la señal es superior a los -90 dB en la mayor parte del *campus*, a excepción de los puntos más alejados en la zona sur y el trayecto analizado en las instalaciones de la Facultad de Odontología y la Facultad de Humanidades. Además se presentó un *handoff* en los alrededores de los edificios T1 y T2, correspondientes a las facultades de Ingeniería y Arquitectura, respectivamente, por intensidad débil de la red 4G. Puede observarse en la figura 46 que la señal decrece (observar color verde antes del rectángulo rojo) y luego se midió un tramo en UMTS hasta donde hubo disponibilidad nuevamente de la red LTE en la región norte del Edificio T2, en donde se recuperó la conectividad con la misma. En la figura 47 se muestra la distribución de la red con el *handoff* agregado, siendo la parte azul la cobertura 4G y la parte roja los puntos en donde se realizó el cambio forzado a 3G.

Figura 46. **Handoff en cobertura para Claro 4G**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Figura 47. Cobertura 4G con *handoff* a 3G (Claro)

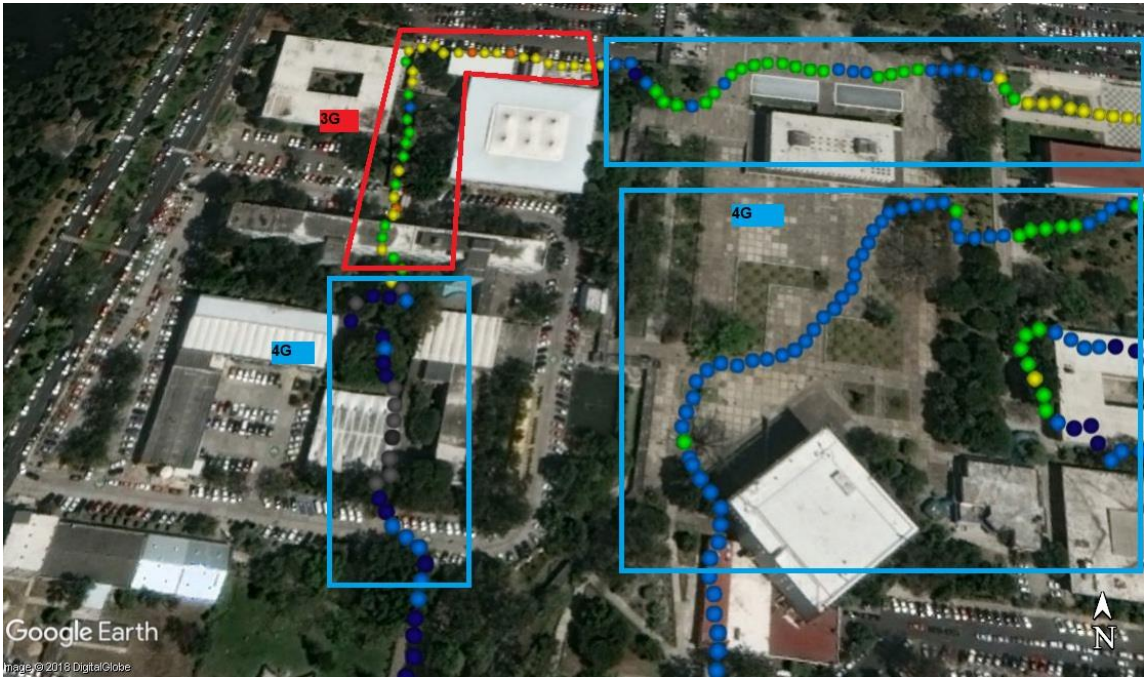


Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Para la cobertura de la red del proveedor Movistar, la intensidad de la señal registrada es en su mayoría débil (por debajo de los -80 dB). En la región central y noreste del *campus*, la intensidad está incluso por debajo de los -90 dB, por lo que la señal es baja y necesita ser mejorada en especial en los alrededores de las facultades de Odontología y Humanidades. En la región sur, la intensidad de la señal es media (puntos verdes y amarillos) y aún puede mejorarse, sin embargo, es lo suficientemente fuerte para mantener conectividad 4G. Muy similar a lo registrado con el proveedor Claro, en los alrededores de las instalaciones de la Facultad de Ingeniería se registró un *handoff* a tecnología 3G, debido a un descenso sustancial en la intensidad de señal recibida a valores menores a -120 dB, representados por los puntos grises en la figura 48 debajo del polígono rojo. En las figuras 48 y 49 se muestran el descenso, los rangos de intensidades registrados, anteriores y

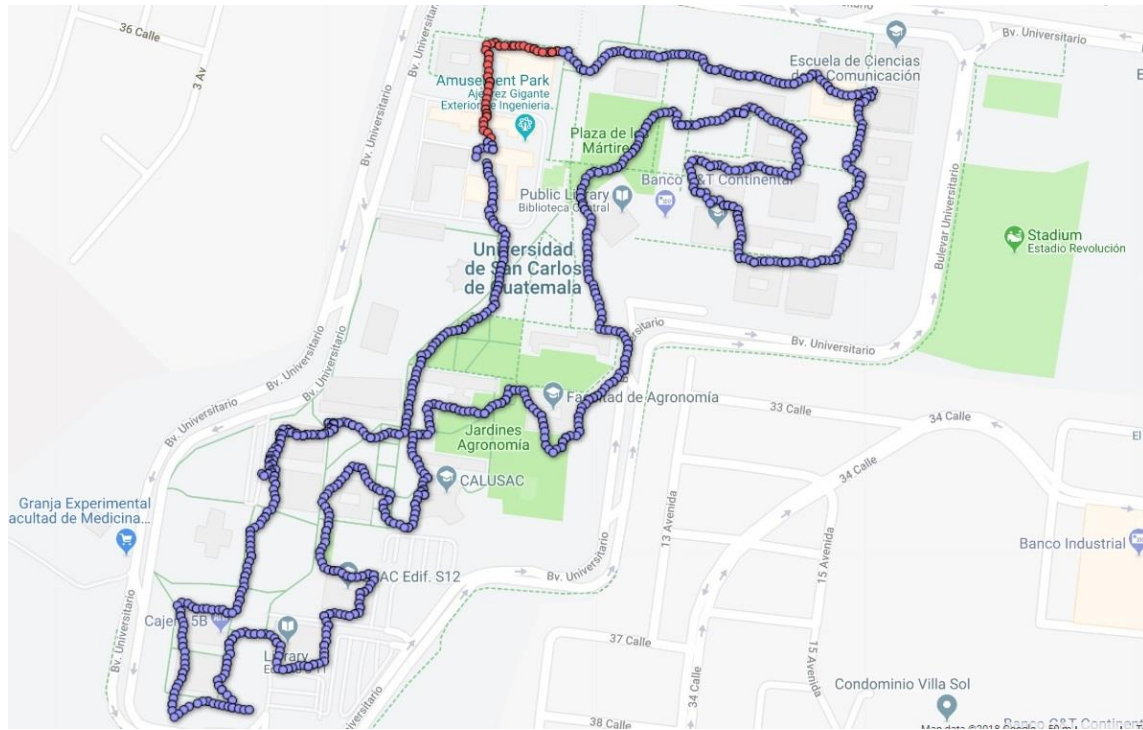
posteriores a perder la conectividad LTE y la distribución de la cobertura, incluyendo el cambio de tecnología.

Figura 48. **Handoff en cobertura para Movistar 4G**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Figura 49. Cobertura 4G con *handoff* a 3G (Movistar)



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

La cobertura LTE en el *campus* existe a lo largo de toda el área evaluada. Sin embargo, gran cantidad de los valores registrados para todas las compañías corresponden a una calidad de señal media o baja. Por lo tanto, es necesario mejorar la infraestructura con la finalidad de proveer cobertura más uniforme, con intensidades de señal recibidas más altas. No existe un alto número de cambios de tecnología por inaccesibilidad a la red LTE, sin embargo, es probable que las terminales móviles se vean forzadas a limitar su conectividad a UMTS en las zonas en donde la potencia recibida sea menor a la necesaria para mantener conectividad LTE.

En comparación, no es posible aseverar que una compañía ofrece la mejor cobertura LTE en el *campus*, resulta necesario dividir el mismo en dos

sectores: norte y sur, debido a que la distribución de la cobertura a lo largo de todo el *campus* no es uniforme en ninguno de los tres proveedores analizados.

En la región norte del *campus* la cobertura es mejor por parte del proveedor Tigo, ya que presenta una mayor cantidad de puntos con intensidades altas respecto a los otros proveedores y no existen sectores con una alta concentración de puntos con intensidades registradas por debajo de los -90 dB, garantizando así la conectividad LTE. La cobertura brindada por la red de Claro es en su mayoría buena en la zona norte del *campus* y presenta un sector amplio con calidad de cobertura excelente (intensidad sobre los -60 dB), sin embargo, presenta en contraste un sector en donde la señal es baja en los alrededores de las facultades de Odontología y Humanidades y un cambio de tecnología en la Facultad de Ingeniería. La red de Movistar necesita mejorar en esta región del *campus*, ya que la mayor parte de intensidades registradas se encuentran por debajo de los -90 dB, en especial en los alrededores del edificio T1 en donde se presentó un cambio forzado a UMTS.

Contrario a la región norte, en la región sur del *campus* la cobertura es mejor por parte de la red de Movistar, no presenta puntos por debajo de los -100 dB y presenta pocos puntos por debajo de los -90 dB. La mayor cantidad de puntos están por encima de los -70 dB y, en los alrededores de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia, los puntos incluso superan los -60 dB. La red de Claro muestra buena cobertura teniendo muy pocos puntos con intensidades por debajo de los -90 Db, con una distribución muy similar a la que se presenta en la zona norte del *campus*. Por otro lado, Tigo tiene cobertura pobre en toda la región sur, predominando las intensidades por debajo de los -90 dB, existiendo varios puntos por debajo de los -100 dB y ninguno superando los -80 dB. Por lo tanto, la cobertura de la red de Tigo necesita mejorarse para garantizar la conectividad con la tecnología LTE en la zona sur del *campus*.

4.4. Mapas de velocidad de carga y descarga de datos

Después de la medición de intensidad de potencia recibida por una terminal móvil para determinar la calidad de cobertura y georreferenciar los sectores donde se necesitan mejoras, es necesario evaluar el estado de la interacción con servicios que requieren transferencia de paquetes de datos. La medición de las tasas de carga y descarga es un aspecto importante que permite determinar si la red que se encuentra desplegada actualmente tiene la capacidad de atender las solicitudes realizadas por los usuarios. Debe considerarse que la terminal móvil utilizada cuenta con compatibilidad LTE de categoría 4, para la cual las velocidades máximas de carga y descarga son 50 Mbps y 150 Mbps, respectivamente.

Todas las mediciones fueron realizadas en el período pico del día (5 a 7 de la tarde), en donde se encuentra la mayor cantidad de estudiantes en el *campus*, siendo este período de alto interés para dimensionar la cantidad de tráfico que debe ser posible atender por la infraestructura de la red.

Para las tres compañías se elaboraron los mapas de velocidad máxima de carga y descarga, y para Tigo y Movistar, adicional, se elaboraron mapas de velocidad promedio de carga y descarga, los cuales no fue posible elaborar con la red de Claro, ya que presentó muchos inconvenientes por indisponibilidad de la red.

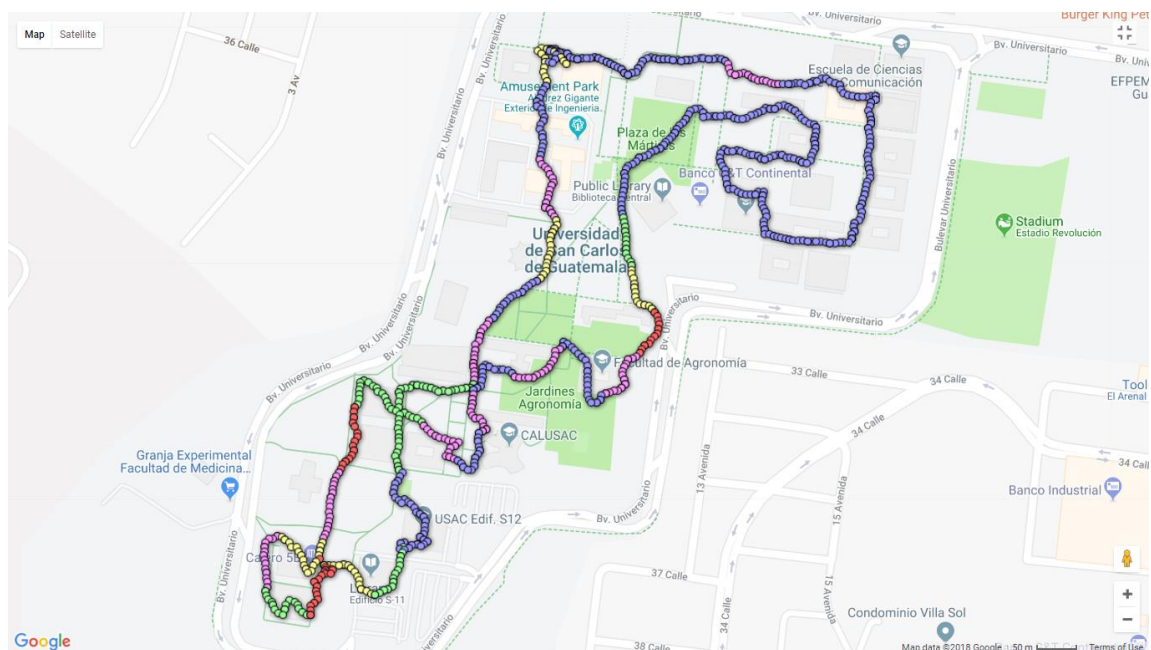
La prueba realizada consistió en utilizar el software nPerf, descrito en la sección 4.2.2, recorriendo un corto tramo en el tiempo que toma la prueba de carga y descarga de archivos binarios, obteniendo valores máximos, promedio y la latencia.

Las velocidades de carga y descarga registradas, al igual que la intensidad de señal recibida, se presentan de forma gráfica en mapas donde se representa cada rango de valores conforme a un código de colores. Debido a los diferentes valores registrados en carga y descarga en cada compañía se presenta con cada mapa la codificación en una tabla de forma similar a la sección anterior.

4.4.1. Mapas de velocidades de carga y descarga para la red de Claro

A continuación se muestran los mapas de velocidades de carga y descarga máximas para la red de Claro. Al realizar las mediciones se obtuvo únicamente valores máximos para las tasas de carga y descarga debido a fallas en las pruebas, ocasionadas por indisponibilidad en la red.

Figura 50. Velocidad de descarga máxima



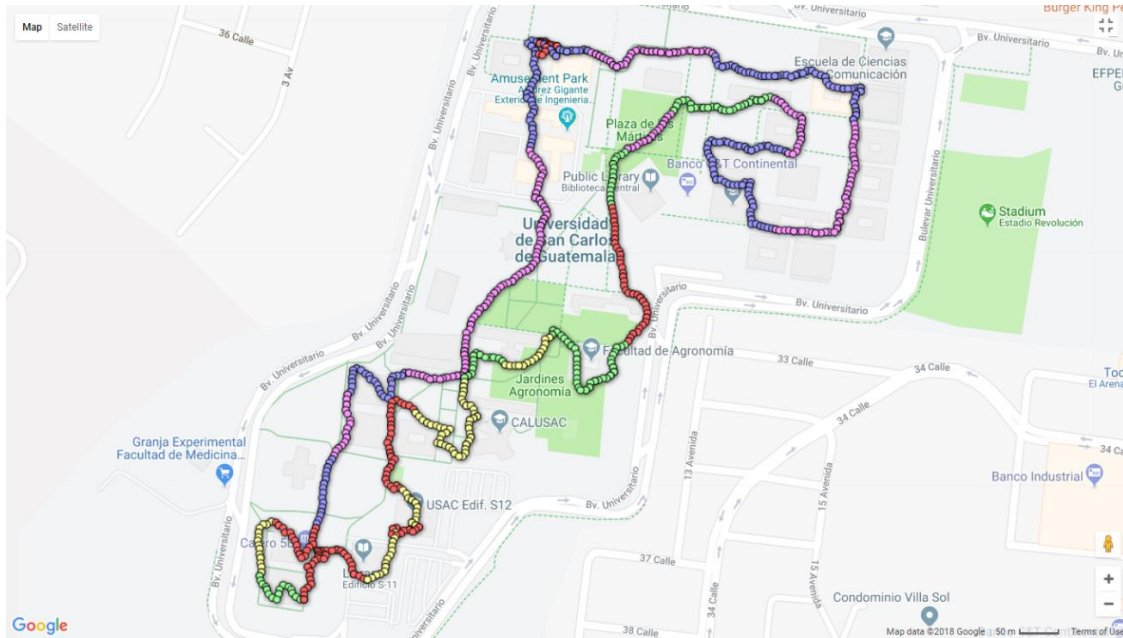
Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Tabla IX. **Codificación de colores para velocidad de descarga máxima**

Color	Rango de velocidad
Rojo	[11.34 , 8) Mbps
Amarillo	[8 , 6] Mbps
Verde	(6 , 4] Mbps
Púrpura	(4 , 2] Mbps
Azul	(2 , 0.61] Mbps

Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala, Google Earth.

Figura 51. **Velocidad de carga máxima**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Tabla X. **Codificación de colores para velocidad de carga máxima**

Color	Rango de velocidad
Rojo	[8.33 , 7) Mbps

Continuación tabla X.

Amarillo	[7 , 5] Mbps
Verde	(5 , 3] Mbps
Púrpura	(3 , 1] Mbps
Azul	(1 , 0] Mbps

Fuente: elaboración propia.

En la figura 50, correspondiente a las velocidades de descarga registradas, puede observarse que la mayor parte de los puntos son azules o púrpura, correspondientes a valores inferiores a los 4Mbps. Estas velocidades de descarga no corresponden a valores típicos de conectividad LTE y podrían ser fácilmente obtenidos con tecnologías UMTS. De igual forma, los fallos en las pruebas se dieron mayormente en la prueba de descarga, por lo que existe alta saturación en el canal.

Los menores valores registrados en las pruebas de descarga se midieron en los alrededores de los edificios T1 y T2 de las facultades de Ingeniería y Arquitectura y los edificios M3, S2, S3, S6, S8 de las facultades de Odontología y Humanidades, respectivamente.

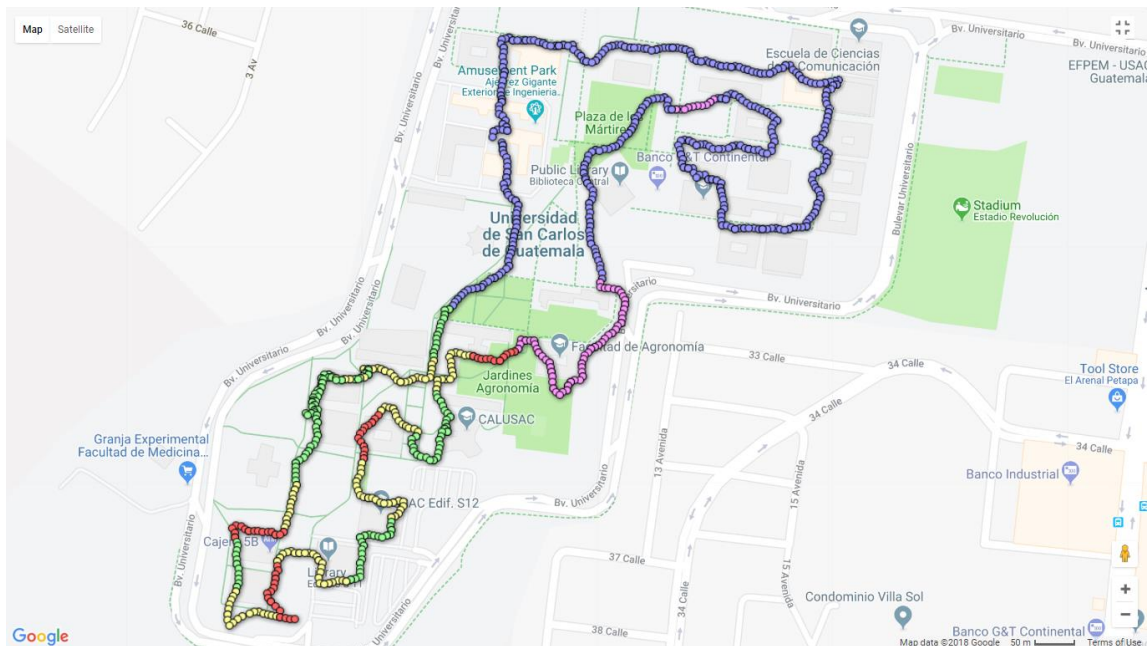
Por otro lado, al evaluar las mediciones de velocidad de carga, puede notarse en la figura 51 que las velocidades de carga, a diferencia de las de descarga, no están mayormente en el intervalo más bajo, por lo que la carga de archivos puede realizarse con mayor fluidez que la descarga. Al igual que en la descarga, las velocidades no corresponden a valores típicos en LTE, sin embargo la mayor cantidad de servicios utilizados actualmente no requieren altas velocidades de carga.

Tabla XI. **Codificación de colores para velocidad de descarga máxima**

Color	Rango de velocidad
Rojo	[88.44 , 70) Mbps
Amarillo	[70 , 50] Mbps
Verde	(50 , 30] Mbps
Púrpura	(30 , 10] Mbps
Azul	(10 , 0.14] Mbps

Fuente: elaboración propia.

Figura 53. **Velocidad de descarga promedio**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Tabla XII. **Codificación de colores para velocidad de descarga promedio**

Color	Rango de velocidad
Rojo	[76.31 , 60) Mbps
Amarillo	[60 , 40] Mbps

Continuación tabla XII.

Verde	(40 , 20] Mbps
Púrpura	(20 , 10] Mbps
Azul	(10 , 0.06] Mbps

Fuente: elaboración propia.

Los valores medidos para las pruebas de descarga en la red de Movistar entregaron resultados con alta diversidad de valores de velocidad de bajada, que difieren en gran medida para la región norte y la región sur.

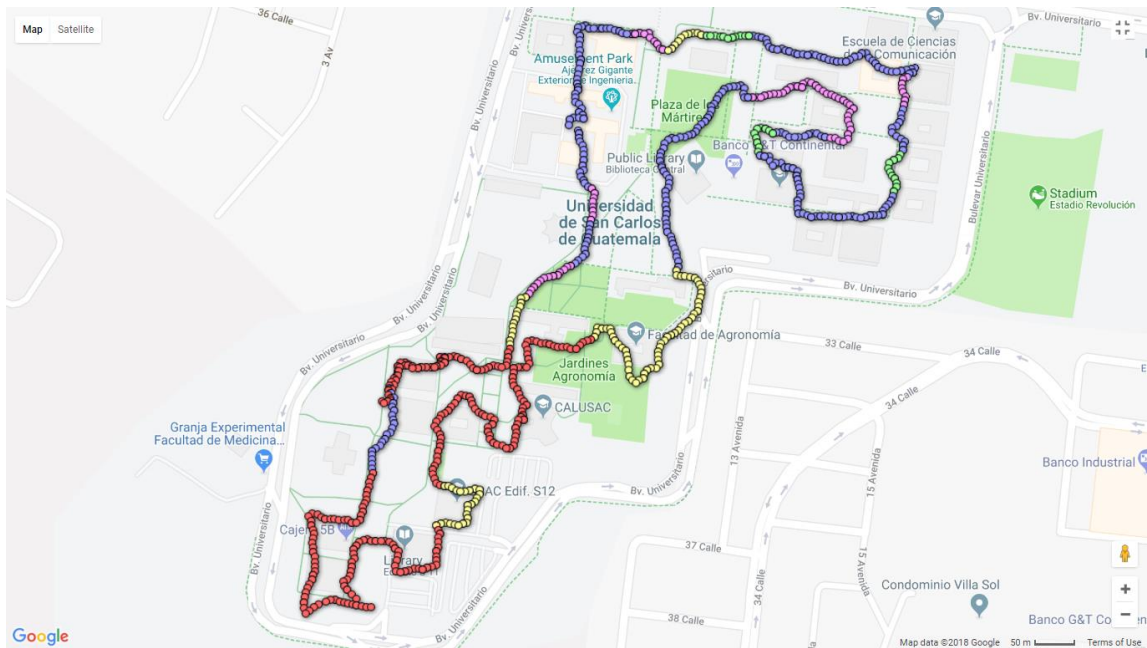
La zona sur del *campus* presenta las mejores velocidades de descarga, siendo estas superiores a los 30 Mbps en su mayoría, con alta disponibilidad en los canales de bajada, reflejada en la satisfactoria realización de las pruebas establecidas para valores máximos y promedio.

Los valores promedio discrepan de los valores máximos medidos por la forma en la que la aplicación discrimina los datos que utiliza para el cálculo final, sin embargo, evaluando únicamente los valores promedio de las velocidades medidas en la región sur del *campus*, estas no discrepan en gran medida respecto a los valores máximos, presentando desviaciones por debajo del 30 %.

En contraste, la región norte contiene los valores de velocidad de descarga más bajos registrados en el *campus*, en los alrededores de la Facultad de Odontología y los edificios S2, S3 y S6. En estos sectores los valores registrados se encuentran por debajo de los 2Mbps, siendo estos valores no correspondientes a conectividad LTE y no coinciden con los valores registrados en la región sur. Como puede observarse en las figuras 52 y 53, la

mayor parte de los puntos graficados están presentados con color azul, que corresponde a tasas por debajo de los 10Mbps, siendo estos más típicos de tecnologías UMTS que fueron detectadas únicamente en los alrededores del T1, donde se realizó un *handoff* por falta de cobertura LTE.

Figura 54. Velocidad de carga máxima



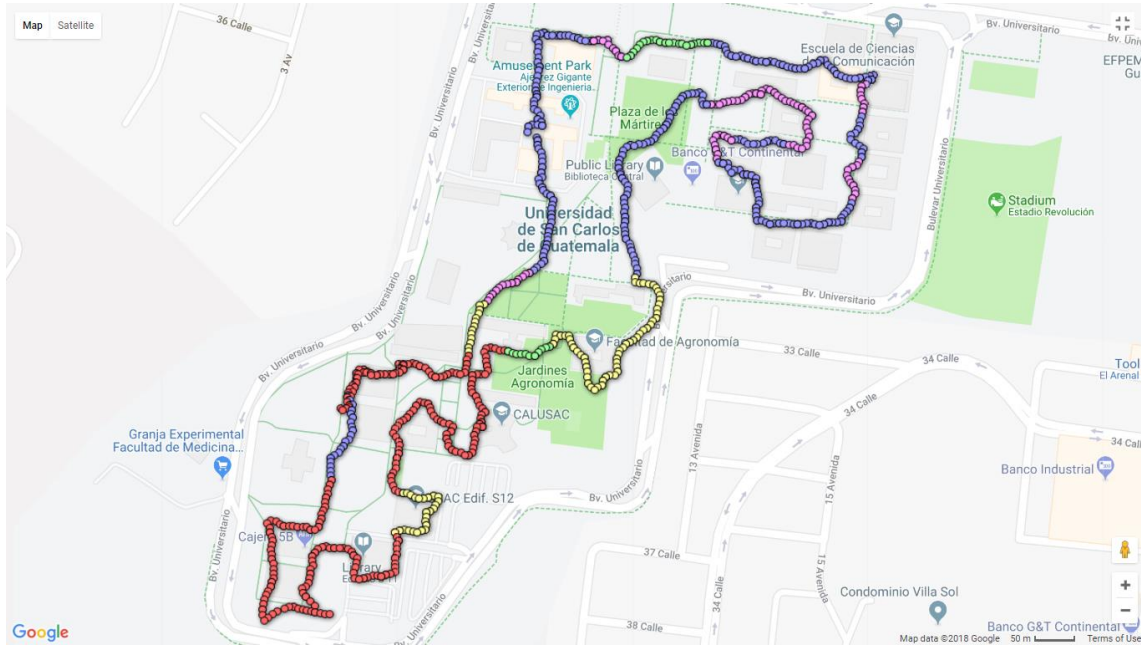
Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Tabla XIII. Codificación de colores para velocidad de carga máxima

Color	Rango de velocidad
Rojo	[41.86 , 30) Mbps
Amarillo	[30 , 20] Mbps
Verde	(20 , 10] Mbps
Púrpura	(10 , 5] Mbps
Azul	(5 , 0] Mbps

Fuente: elaboración propia.

Figura 55. Velocidad de carga promedio



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Tabla XIV. Codificación de colores para velocidad de carga promedio

Color	Rango de velocidad
Rojo	[40.45 , 30) Mbps
Amarillo	[30 , 20] Mbps
Verde	(20 , 10] Mbps
Púrpura	(10 , 5] Mbps
Azul	(5 , 0] Mbps

Fuente: elaboración propia.

Similar a los valores registrados en las pruebas de descarga de archivos binarios, las tasas de subida medidas son más altas en la zona sur del *campus*, comparadas a las obtenidas en la zona norte.

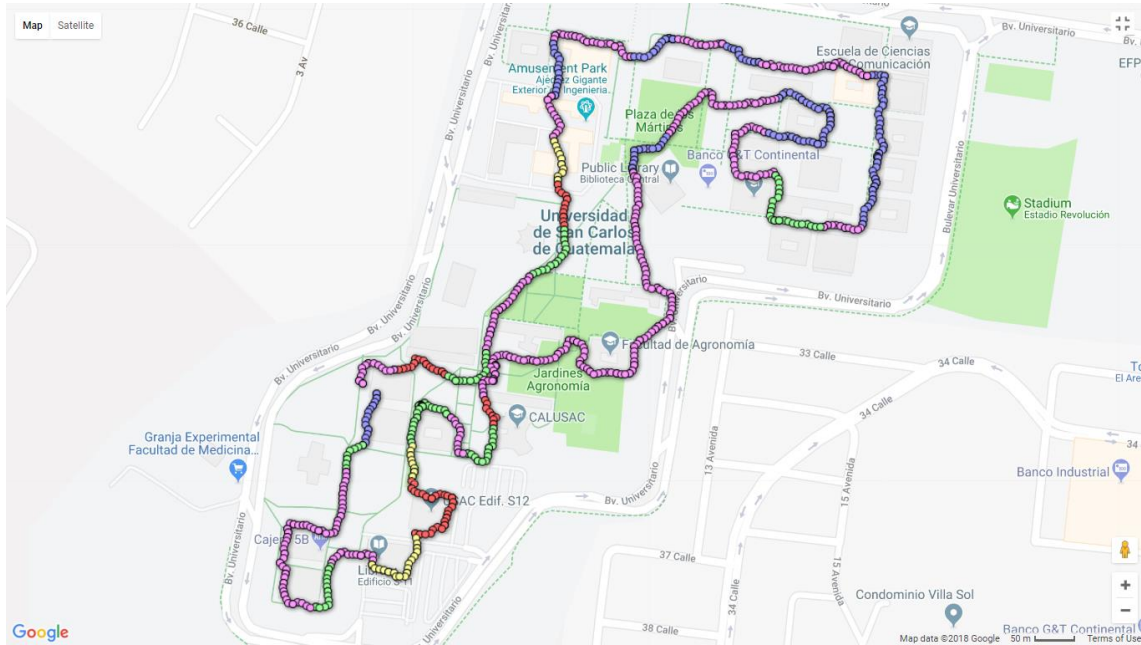
Las velocidades de subida en la región sur del *campus* son en su mayoría superiores a los 30Mbps, como puede observarse por la predominancia del color rojo en las figuras 54 y 55. Estas son velocidades características de tecnologías LTE de categoría 4 y, siendo el máximo definido de 50 Mbps, las tasas de carga registradas en la zona sur son óptimas para el uso de aplicaciones que requieran un canal de subida.

En la región norte del *campus*, contrario a la región sur, la mayor parte de velocidades registradas se encuentran por debajo de los 5Mbps, siendo especialmente bajas en los alrededores de los edificios T1, M2, M3, S2, S4 y S6.

4.4.3. Mapas de velocidades de carga y descarga para la red de Tigo

A continuación se muestran los mapas de velocidades de carga y descarga máximas y promedio para la red de Tigo con su respectiva codificación de colores.

Figura 56. **Velocidad de descarga máxima**



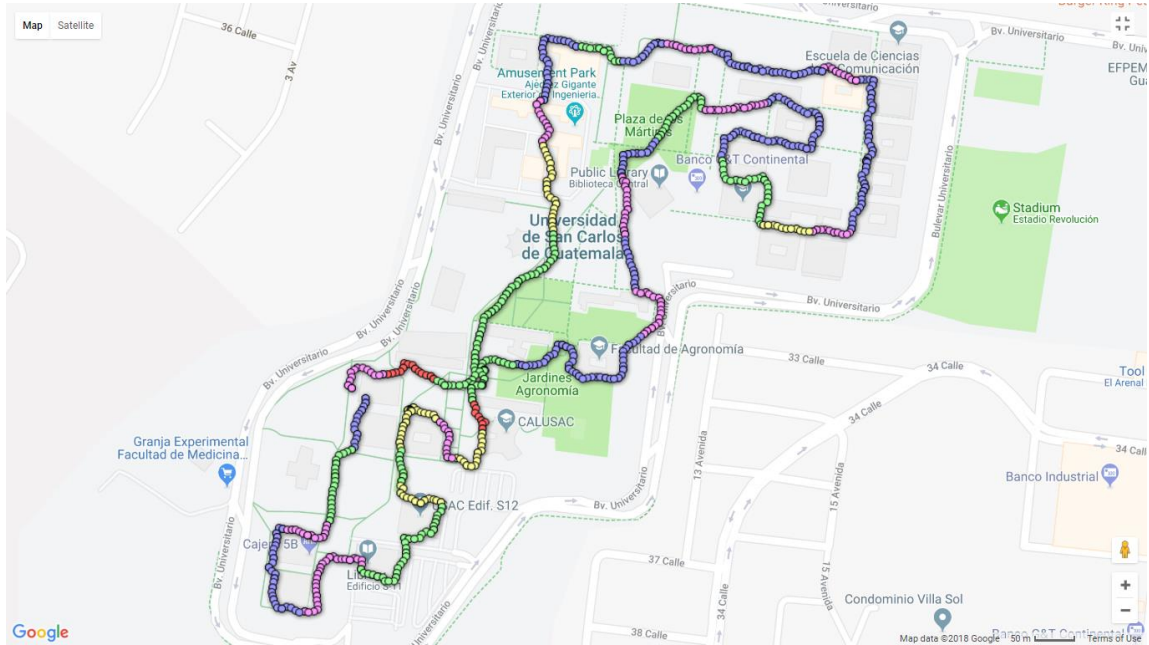
Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Tabla XV. **Codificación de colores para velocidad de descarga máxima**

Color	Rango de velocidad
Rojo	[41.60 , 40) Mbps
Amarillo	[40 , 30] Mbps
Verde	(30 , 20] Mbps
Púrpura	(20 , 5] Mbps
Azul	(5 , 0.61] Mbps

Fuente: elaboración propia.

Figura 57. Velocidad de descarga promedio



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Tabla XVI. Codificación de colores para velocidad de descarga promedio

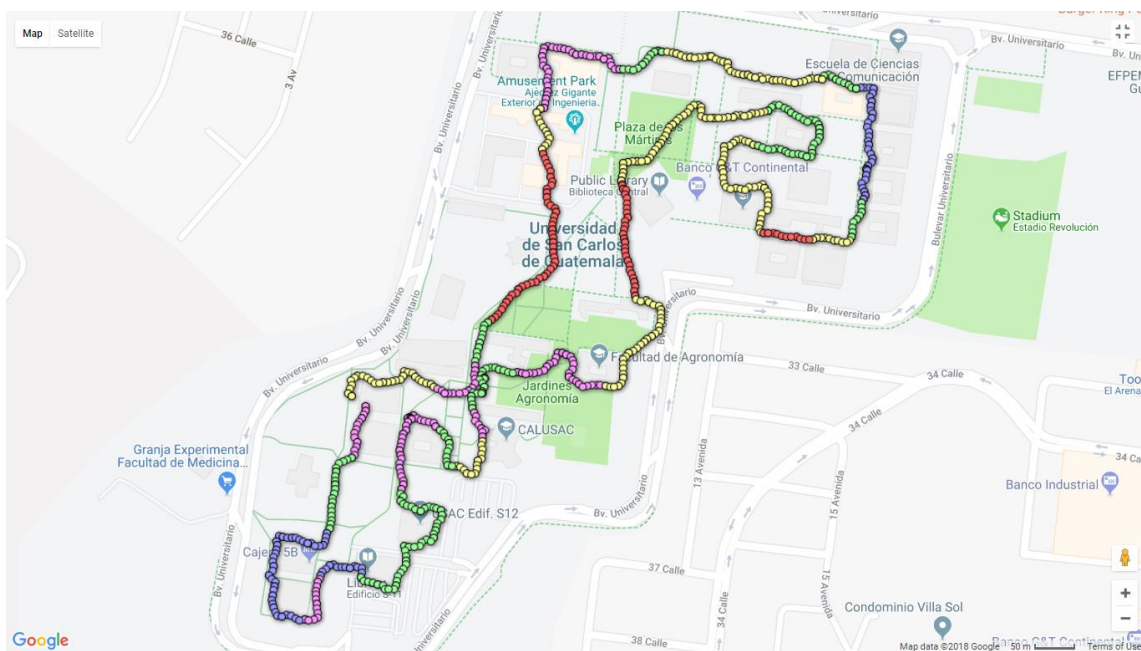
Color	Rango de velocidad
Rojo	[39.62 , 30) Mbps
Amarillo	[30 , 20] Mbps
Verde	(20 , 10] Mbps
Púrpura	(10 , 5] Mbps
Azul	(5 , 0.29] Mbps

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura 56, la red de Tigo provee una gama de velocidades de descarga máxima más uniforme a la de los otros proveedores analizados. La mayor parte del mapa está representado en color púrpura, que corresponde al intervalo de velocidades que superan los 5 Mbps y no exceden los 20 Mbps. Las tasas más altas registradas no exceden los 42 Mbps y se

encuentran únicamente en los alrededores de los edificios S11, T9 y T11. Los datos registrados sugieren alta disponibilidad de la red, ya que todas las pruebas fueron realizadas exitosamente. No obstante, las velocidades de descarga son bajas en relación al máximo de 150 Mbps fijado por el estándar de tecnología LTE disponible en la terminal móvil.

Figura 58. Velocidad de carga máxima



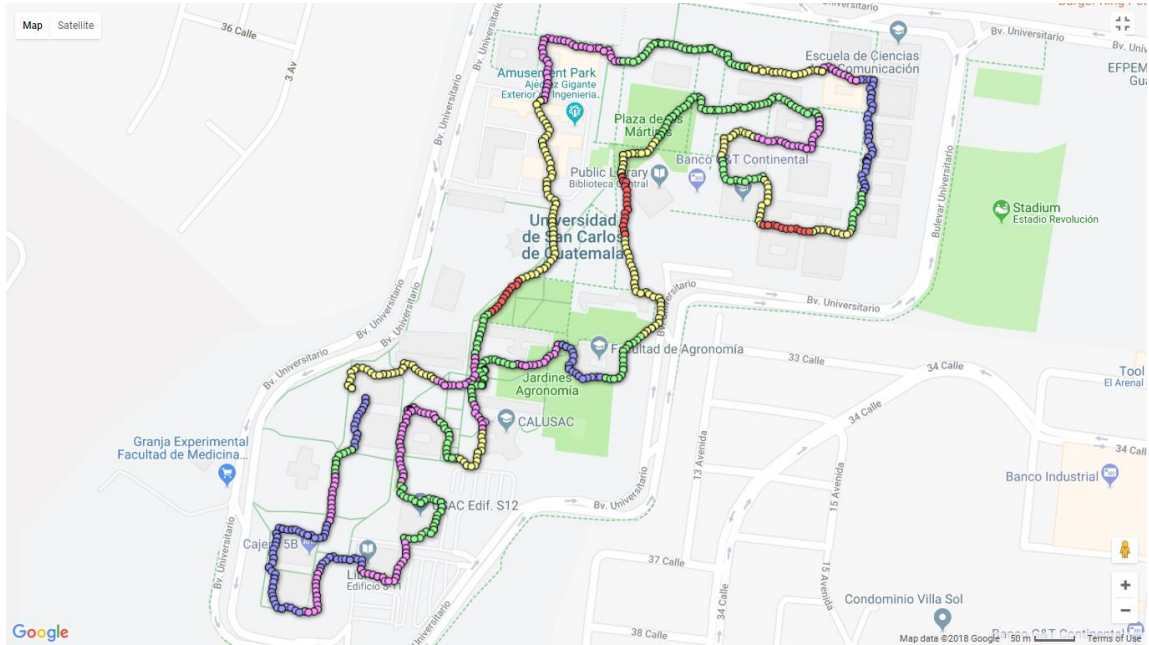
Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Tabla XVII. Codificación de colores para velocidad de carga máxima

Color	Rango de velocidad
Rojo	[23.55 , 20) Mbps
Amarillo	[20 , 15] Mbps
Verde	(15 , 10] Mbps
Púrpura	(10 , 5] Mbps
Azul	(5 , 1.64] Mbps

Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **Velocidad de carga promedio**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Google Earth.

Tabla XVIII. **Codificación de colores para velocidad de carga promedio**

Color	Rango de velocidad
Rojo	[22.07 , 20) Mbps
Amarillo	[20 , 15] Mbps
Verde	(15 , 10] Mbps
Púrpura	(10 , 5] Mbps
Azul	(5 , 1.27] Mbps

Fuente: elaboración propia.

En las figuras 58 y 59 se muestran las representaciones gráficas para los distintos intervalos correspondientes a las velocidades de carga registradas a lo largo del *campus* universitario. En las imágenes puede observarse que existen pocas regiones de mínima velocidad (representadas en color azul),

comprendidas en los alrededores de la Facultad de Humanidades y los edificios S10 y S11.

4.4.4. Comparación de resultados de velocidades de carga y descarga

A continuación se muestra un resumen comparativo de las velocidades registradas durante las pruebas realizadas a lo largo del *campus*. Los valores máximos en cada categoría se encuentran resaltados con negrilla y los valores mínimos se presentan con color rojo. Además, se presentan mapas de comparativos en donde se incluyen las tres compañías analizadas.

Tabla XIX. **Tabla comparativa de velocidades de carga y descarga**

Operador	Min. Descarga	Min. Carga	Máx. Descarga	Máx. Carga	Promedio Descarga	Promedio Carga
Claro	0 Mbps	0 Mbps	11.34 Mbps	8.33 Mbps	2.99 Mbps	3.70 Mbps
Movistar	0.14 Mbps	0 Mbps	88.44 Mbps	40.86 Mbps	31 Mbps	19 Mbps
Tigo	0.61 Mbps	1.64 Mbps	45.4 Mbps	22.55 Mbps	15.46 Mbps	12.52 Mbps

Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Mapas de velocidad de descarga con criterios unificados**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Codificación de colores para mapas de velocidad de descarga con criterios unificados**

Color	Rango de velocidad
Rojo	[88.44 , 60) Mbps
Amarillo	[60 , 40] Mbps
Verde	(40 , 20] Mbps
Púrpura	(20 , 10] Mbps
Azul	(0 , 10] Mbps

Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Mapas de velocidad de carga con criterios unificados**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Codificación de colores para mapas de velocidad de carga con criterios unificados**

Color	Rango de velocidad
Rojo	[40.86, 30) Mbps
Amarillo	[30 , 20] Mbps
Verde	(20 , 10] Mbps
Púrpura	(10 , 5] Mbps
Azul	(0 , 5] Mbps

Fuente: elaboración propia.

En la sección anterior se ilustró en mapas los intervalos de velocidades de carga y descarga medidos a lo largo del *campus* universitario, definiendo intervalos diferentes para cada proveedor de servicio, con el objetivo de evaluar individualmente la cobertura. Para fines comparativos, en las figuras 60 y 61 se muestran los mapas de velocidad, redibujados con intervalos (tablas XX y XXI) aplicados a todos los operadores.

En comparación, con la información compilada en las figuras y tablas de esta sección, a partir de los resultados medidos en el *campus* universitario,

puede notarse que, de los tres operadores, Claro es el operador que ofrece las tasas, tanto de carga como descarga, más bajas de los tres operadores evaluados. Como fue mencionado en la sección anterior, estas velocidades medidas no corresponden a valores típicos de conectividad de cuarta generación LTE. Por lo tanto, a pesar de existir cobertura LTE en la mayor parte del *campus*, esto no presenta ventaja sobre los parámetros que pueden ofrecer las redes con tecnología UMTS.

Respecto a los otros dos operadores, Movistar ofrece las velocidades de carga y descarga más altas en el *campus*. En la región sur del *campus* donde el servicio de este proveedor es óptimo, las tasas de transferencia sobrepasan en gran medida a las ofrecidas por la red de Tigo. Sin embargo, la red de Tigo ofrece velocidades en su mayoría entre 10 y 40 Mbps, ofreciendo canales disponibles en todo momento en carga y descarga, a diferencia de los otros operadores evaluados, que presentaron indisponibilidad en algún momento en los canales de subida y bajada.

En resumen, Tigo presenta una red sólida que permite la navegación ininterrumpida a lo largo del *campus* y Movistar presenta los valores más altos de transferencia en carga y descarga, sin embargo no se mantienen a lo largo del *campus* universitario. Por lo tanto, Tigo necesita una mejora en los valores efectivos de velocidad de carga y descarga, mientras que Movistar necesita mejorar la cobertura en la zona norte del *campus* para garantizar las velocidades que ofrece en la zona sur también en la zona norte.

Cabe resaltar que los tres operadores tienen sus valores mínimos en velocidades de carga y descarga en las facultades de Odontología, Derecho y Humanidades, alrededor de los edificios M3, S1, S3, S4 y S6. En este punto todos los operadores presentaron problemas en las pruebas de carga y

descarga, así como valores bajos de intensidad de potencia recibida por la terminal móvil, por lo que es necesario implementar una mejora de cobertura que permita normalizar el servicio y garantizar la integridad de las transferencias de datos.

4.4.5. Diagnóstico final de la red de telefonía celular

En resumen, los datos recopilados en las mediciones de campo ofrecen una visión general de la cobertura y la calidad del servicio en relación a las tasas de transferencia en carga y descarga. Estos datos implican la necesidad de medidas correctivas que puedan solucionar los siguientes problemas:

- Falta de cobertura LTE en los alrededores de las facultades de Odontología y Humanidades: en este sector la cobertura es escasa para las tres compañías analizadas y como resultado las tasas de carga y descarga presentan también sus valores mínimos. Por lo tanto, es necesaria una mejora en los parámetros de los sitios existentes o bien la adición de un sitio dedicado a servir esta región del *campus* universitario.
- Velocidades por debajo de los valores típicos en redes LTE para la empresa Telecomunicaciones de Guatemala, S. A.: el proveedor con nombre comercial Claro presenta velocidades a lo largo del *campus* que no satisfacen los criterios establecidos para tecnologías de cuarta generación, debido a indisponibilidad en los canales de subida y principalmente de bajada. Es necesaria la adición de más canales que permitan elevar las tasas efectivas de transferencia y la disponibilidad de la red de datos.
- Falta de cobertura LTE en los alrededores de las facultades de Ingeniería y Arquitectura para Claro y Movistar: estas dos compañías, como se describió en la sección 4.3.3, presentan niveles bajos de cobertura en los alrededores de los edificios T1 y T2, que resultan en cambios forzados a tecnología de

tercera generación. Por lo tanto, es necesario modificar los parámetros de la red existente o bien instalar una antena que brinde cobertura LTE a lo largo de este sector.

5. ELABORACIÓN DE PROPUESTA DE MEJORA DE COBERTURA

En el capítulo anterior se determinó dos sectores de especial atención en el *campus* universitario, en los cuales la potencia de la señal recibida por las terminales móviles no permite la apropiada interacción con la red de telefonía móvil. Para ello se plantea la adición de dos sitios nuevos que serían una solución genérica, aplicable a cualquiera de las tres compañías analizadas que comparten estos sectores con deficiencias de cobertura. No es posible modificar los parámetros de la red existente, ya que se desconocen los datos de la topología actualmente desplegada por los operadores de telefonía móvil, siendo esta información confidencial.

Para la elaboración de la propuesta se utilizó el software Radio Mobile como simulador de cobertura. A continuación se describen los sitios propuestos y demás elementos y parámetros de red pertinentes a los mismos:

5.1. Consideraciones de transmisión

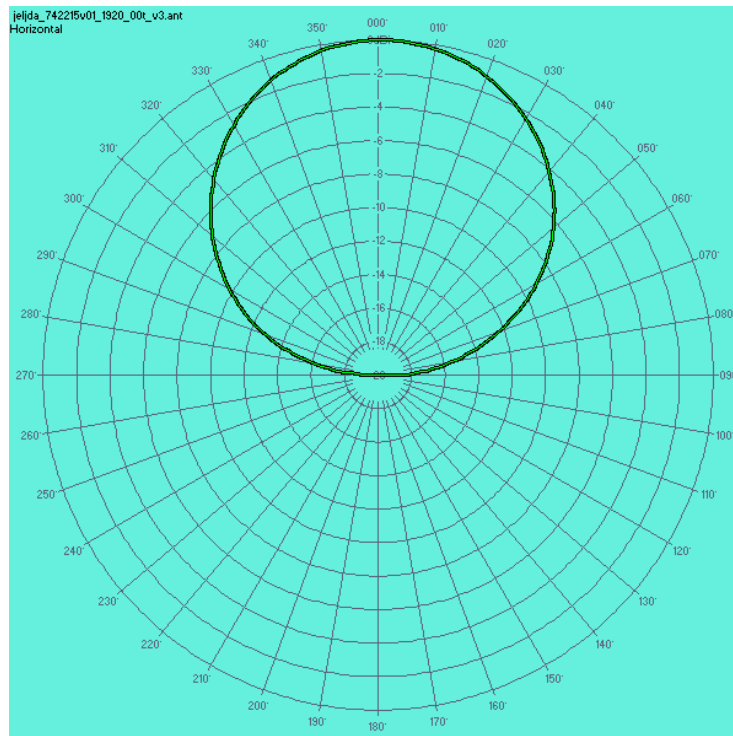
Para la transmisión se propone la utilización de una antena direccional Kathrein 742215 utilizada comúnmente en el país en infraestructura de comunicaciones móviles. Las especificaciones de dicha antena pueden encontrarse en la hoja de datos proveída por el fabricante. Adicionalmente, el soporte técnico de este provee el patrón de radiación en cada frecuencia de operación de la antena, y este fue utilizado en la simulación de la cobertura.

Tabla XXII. **Resumen de especificaciones técnicas de la antena propuesta**

Kathrein 742215	
Rango de frecuencias de operación	1920 MHz – 2200 MHz
<i>Gain at mid Tilt</i>	18.2 dBi
<i>Gain over all Tilts</i>	(18.1 ± 0.3) dBi
<i>Azimuth Beam Width (horizontal Pattern)</i>	(63 ± 3.4) °
<i>Elevation Beam Width (vertical Pattern)</i>	(6.4 ± 0.4) °
<i>Impedance</i>	50 Ω
<i>Max. Effective Power</i>	500 W

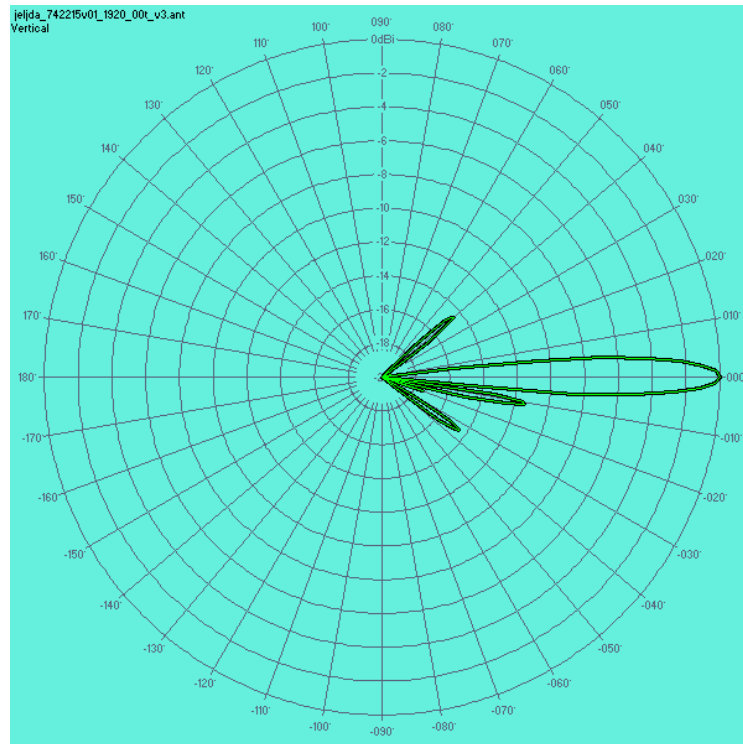
Fuente: hoja técnica de datos de Kathrein 742215.

Figura 62. **Patrón de radiación horizontal de la antena propuesta**



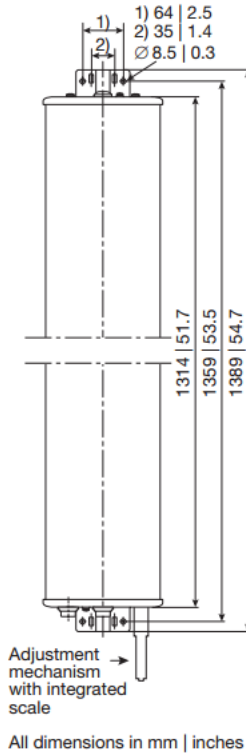
Fuente: elaboración propia con base en archivos proveídos por soporte técnico de Kathrein.

Figura 63. **Patrón de radiación vertical de la antena propuesta**



Fuente: elaboración propia con base en archivos proveídos por soporte técnico de Kathrein.

Figura 64. Dimensiones de la antena Kathrein 742215

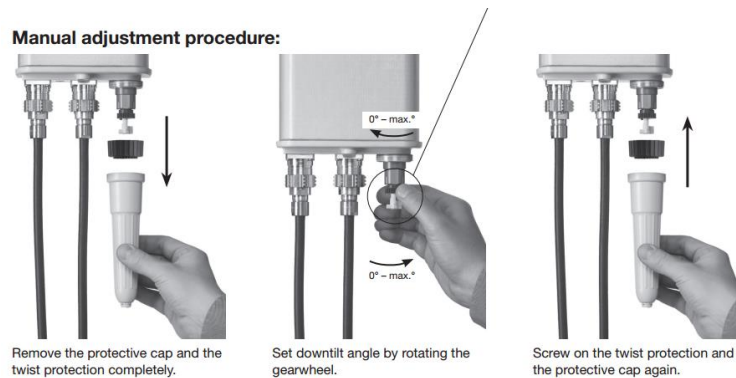


936.4875/d ngmn 04.18.02.01 Subject to alteration.

Fuente: hoja técnica de datos, Kathrein 742215.

Además, la antena cuenta con un mecanismo manual de ajuste para el *downtilt*, cuyo conocimiento es de especial importancia para la configuración en los nuevos sitios a agregarse. Opcionalmente, puede agregarse un controlador remoto para el ángulo, cuya información puede ser encontrada en la respectiva hoja técnica de datos.

Figura 65. **Mecanismo de ajuste del *downtilt***



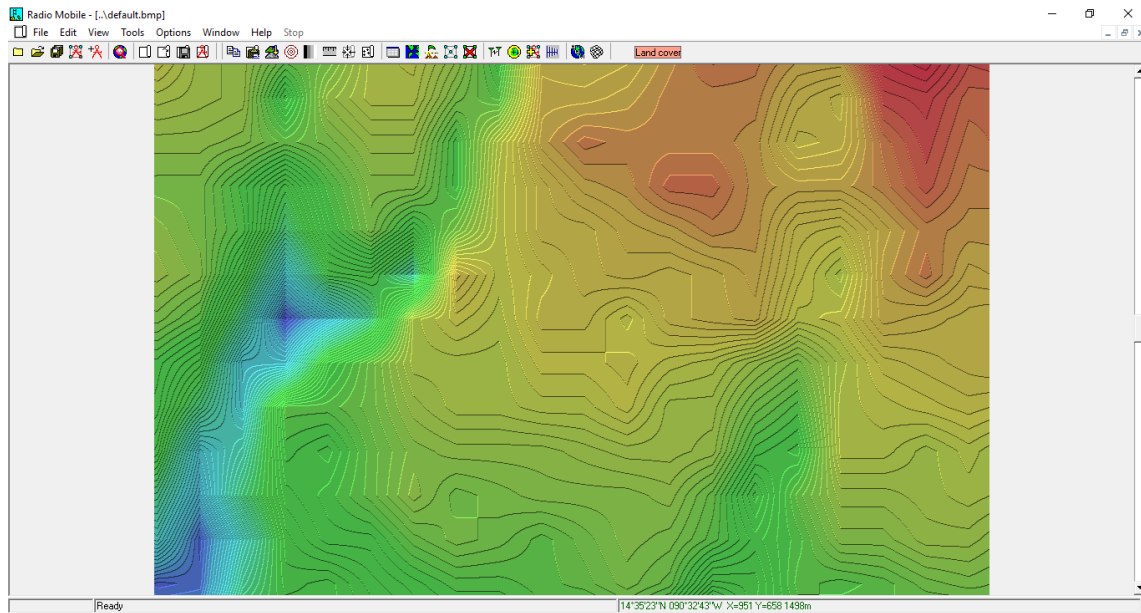
Fuente: hoja técnica de datos, Kathrein 742215.

5.2. **Software de simulación Radio Mobile**

Radio Mobile es una herramienta de software gratuita orientada a la simulación del desempeño de sistemas de radio. Entre sus principales características se encuentran:

- Utiliza datos de elevación de terreno para simular los perfiles que afectan los radioenlaces o radiocoberturas.
- Permite la superposición de imágenes satelitales provenientes de diferentes fuentes (principalmente Google Earth).
- Permite simular señales de radio con frecuencias emitidas desde 20 hasta 20 000 MHz.
- Admite importación de patrones de radiación de antenas a partir de archivos msi.
- Permite agregar parámetros importantes para consideraciones en señales de radio como climas, refractividad, conductividad y permitividad del terreno.
- Pueden simularse hasta 50 redes, con 1 000 elementos de red y 255 sistemas diferentes de elementos.

Figura 66. **Software Radio Mobile**



Fuente: captura de pantalla, programa Radio Mobile.

Para la simulación de un sitio y su respectiva cobertura es necesario establecer los siguientes parámetros dentro del programa:

- Las coordenadas y altura para la(s) antena(s) propuesta(s).
- Las frecuencias mínima y máxima de operación.
- El tipo de polarización (vertical u horizontal).
- La topología de la red (red de voz o red de datos).
- El tipo de antena (puede ser definido por el usuario a partir del patrón de radiación)
- La potencia de transmisión (en este caso, es definida por el estándar LTE).
- La ganancia de la antena.
- El umbral de voltaje de la antena receptora.
- El *azimuth* y el *tilt* de la antena.

5.3. Adición de sitio para mejora de cobertura en los alrededores de las facultades de Humanidades y Odontología

A continuación se muestran los parámetros empleados en la simulación y los resultados obtenidos de la misma para la mejora en la cobertura en las ubicaciones propuestas.

5.3.1. Parámetros de simulación

En la sección 5.2 se detalló el conjunto de parámetros ingresados en la simulación de cobertura para los sitios adicionados. Para este sitio los parámetros propuestos se encuentran en la tabla siguiente:

Tabla XXIII. Parámetros de simulación del primer sitio

Tipo de antena	Kathrein 742215
Coordenadas	Longitud: 14.587134 Latitud: -90.547305
Altitud del sitio	1489 m
Altura de la antena	26 m
Tipo de estructura	Monoposte
Topología	Red de Datos (Cluster)
Potencia de transmisión	20 W (43dBm)
Ganancia de la antena	18 dBi
Umbral del receptor	100 μ V
Valor del <i>azimuth</i>	260°
Valor del <i>downtilt</i>	6°

Fuente: elaboración propia.

De esta tabla, las coordenadas fueron definidas para una ubicación factible de ubicación en los alrededores del *campus* universitario. La altitud del sitio es obtenida de los datos de altitud del programa. La altura de la antena se eligió por los valores utilizados comúnmente en antenas de telefonía en el país y la potencia de transmisión se eligió como la mínima definida por el estándar LTE. El valor del *azimuth* se eligió observando los cambios en el patrón de

radiación para obtener la mejor cobertura en el sitio deseado y el valor del *tilt* se calculó con base en la ecuación 3.1. Los demás parámetros pueden encontrarse en la tabla XXII o bien en la hoja técnica de datos de la antena propuesta.

5.3.1.1. Cálculo del *downtilt* de la antena

Para el cálculo de este ángulo se consideró una antena receptora a la altura de una persona en el centro de la zona sin cobertura. Para ello se midió dentro del programa Radio Mobile la distancia aproximada entre la antena y el sector sin cobertura y se consideró los parámetros siguientes:

Tabla XXIV. **Parámetros para el cálculo del *downtilt***

Altura de la antena emisora	26 m
Altura de la antena receptora	1.70 m
Distancia entre emisor y receptor	212 m

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se aplicó la ecuación 3.1 y se obtuvo el valor final, el cual fue truncado para garantizar la cobertura en el sector.

$$A_{dt} = \tan^{-1} \left(\frac{26.0 - 1.7}{212} \right) = 6.53^\circ \cong 6^\circ$$

5.3.1.2. Fotografías del lugar propuesto para la adición del sitio

Las coordenadas indicadas en la tabla XXIII corresponden al área deportiva de la universidad, que en conjunto comprende las canchas de tenis, la piscina y el estadio, y colinda con la Escuela de Profesores de Enseñanza

Media (EFPEM) de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Existen dos posibilidades para la instalación de la antena, puede instalarse a un costado de las canchas de tenis (opción 1), lugar en donde se encuentran actualmente instalados postes de distribución de energía eléctrica, o bien, en el parqueo de EFPEM (opción 2), donde se cuenta con más espacio disponible sin afectar en gran medida los parámetros propuestos para garantizar la cobertura.

Figura 67. **Entrada al complejo deportivo (opción 1)**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala, Instalaciones Deportivas.

Figura 68. Lugar de Instalación del sitio 1 (opción 1)



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala, Instalaciones Deportivas.

Figura 69. Lugar de instalación del sitio 1 (opción 2)

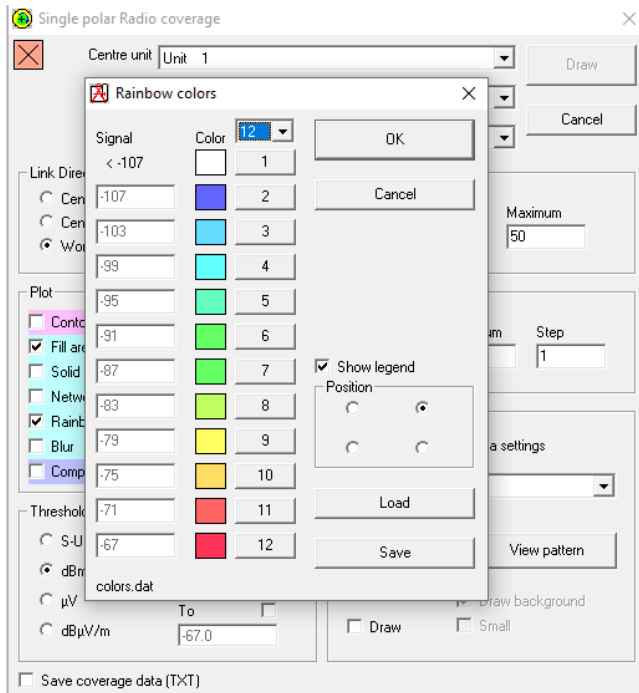


Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala, Parqueo EFPEM.

5.3.2. Resultados de la simulación

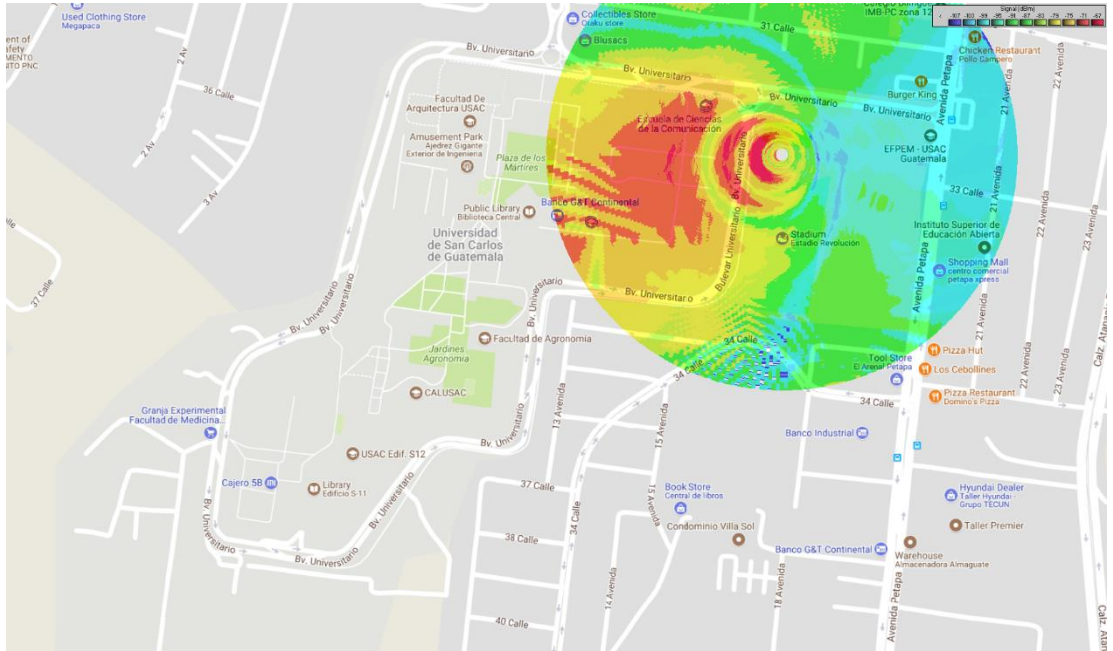
Utilizando los parámetros descritos en la sección 5.3.1 y el software Radio Mobile se computó la simulación de cobertura del sitio utilizando un radio del área afectada de 400 metros. La simulación construye una gráfica sobre los mapas del *campus* universitario, que consta de diversos colores que corresponden a un rango de intensidad de la potencia irradiada que se detalla en la figura siguiente:

Figura 70. Codificación de colores en mapa de cobertura simulada



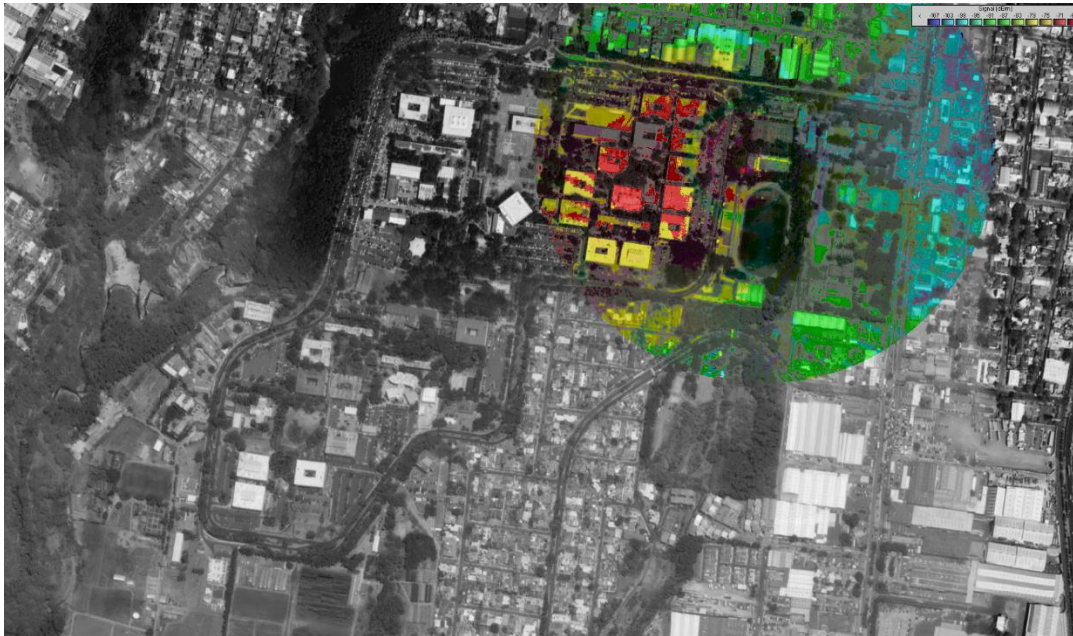
Fuente: captura de pantalla, Radio Mobile.

Figura 71. Cobertura de sitio 1 con road maps



Fuente: elaboración propia, exportado del programa Radio Mobile.

Figura 72. Cobertura de sitio 1 con fotografías aéreas



Fuente: elaboración propia, exportado del programa Radio Mobile.

Los resultados obtenidos con los parámetros propuestos son satisfactorios, ya que la antena propuesta debería poder suministrar cobertura a la región sin cobertura, que comprende los alrededores de las facultades de Odontología y Humanidades. Dicho sitio presenta una solución para las tres compañías de telefonía analizadas, ya que todas carecen de cobertura en dicha región. Puede utilizarse distintos tipos de antena y/o arreglos de antenas. Sin embargo, la solución propuesta se presenta de forma sencilla y escalable para diferentes dispositivos de tecnología más avanzada.

La adición de este sitio es suficiente para solucionar los problemas de cobertura e indisponibilidad de canales para los proveedores Tigo y Movistar, dado que dicha indisponibilidad se genera por baja intensidad de la potencia recibida por el terminal móvil. Para el proveedor Claro se mejoraría significativamente la cobertura en dicho sector, sin embargo, la indisponibilidad

de canales de subida y bajada es algo constante a lo largo del *campus*, independientemente de los valores medidos de potencia recibida.

5.4. Adición de sitio para mejora de cobertura en los alrededores de las facultades de Ingeniería y Arquitectura

A continuación se muestran los parámetros empleados en la simulación y los resultados obtenidos de la misma para la mejora en la cobertura en las ubicaciones propuestas.

5.4.1. Parámetros de simulación

Análogo a la sección 5.3, los parámetros utilizados para la adición del sitio se detallan en la tabla XXV. Los parámetros correspondientes a especificaciones técnicas de la antena propuesta son los mismos y varían las coordenadas del sitio y los valores del *azimuth* y el *downtilt*, que están definidos por el sector al que desea brindársele la cobertura.

Tabla XXV. Parámetros de simulación del primer sitio

Tipo de antena	Kathrein 742215
Coordenadas	Longitud:14.583968 Latitud: -90.554001
Altitud del sitio	1485.5
Altura de la antena	26 m
Tipo de estructura	Monoposte Ecológico
Topología	Red de Datos (Cluster)
Potencia de transmisión	20 W (43dBm)
Ganancia de la antena	18 dBi
Umbral del receptor	100 μ V
Valor del <i>azimuth</i>	275°
Valor del <i>downtilt</i>	11°

Fuente: elaboración propia.

5.4.1.1. Cálculo del *downtilt* de la antena

Para este sitio, de nuevo se utilizó la ecuación 3.1 en conjunto con las alturas de las antenas emisora y receptora y la distancia entre ellas, representada por la distancia entre el sitio y la nueva área de cobertura, medida en Radio Mobile.

Tabla XXVI. **Parámetros para el cálculo del *downtilt***

Altura de la antena emisora	26 m
Altura de la antena receptora	1.70 m
Distancia entre emisor y receptor	m

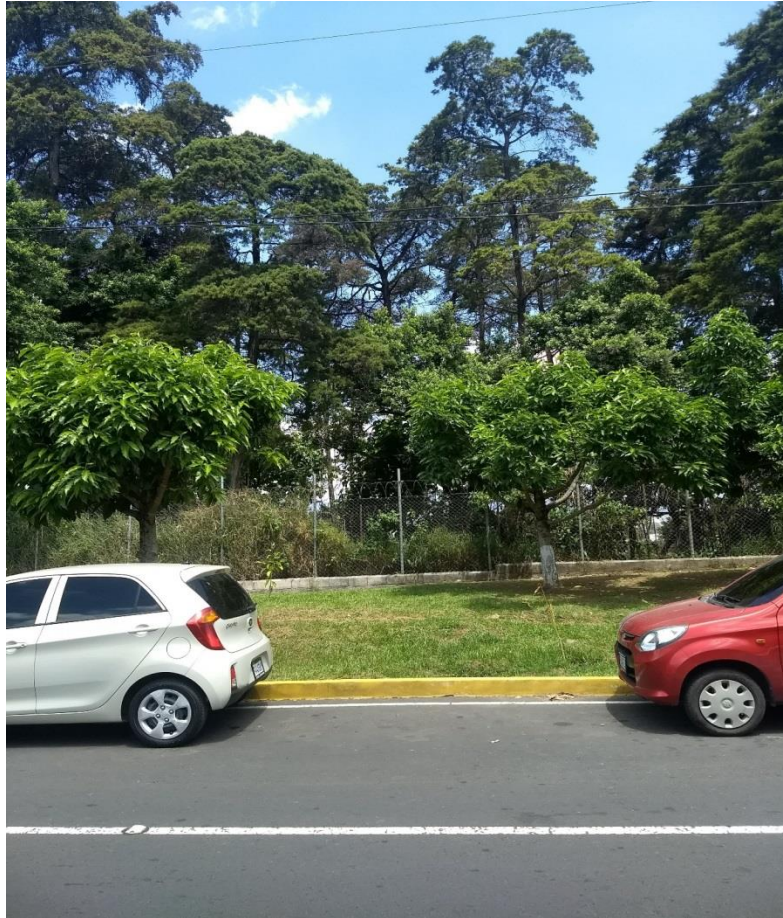
Fuente: elaboración propia.

$$A_{dt} = \tan^{-1} \left(\frac{26.0 - 1.7}{125} \right) = 11.001^\circ \cong 11^\circ$$

5.4.1.2. Fotografías del lugar propuesto para la adición del sitio

Las coordenadas indicadas en la tabla XXV corresponden a un sector en la periferia universitaria. No hay construcciones alrededor, a excepción de la línea de distribución de energía eléctrica. Se recomienda, debido a la alta cantidad de arbolado y vegetación del terreno, instalar una estructura tipo monoposte ecológico, para mantener al mínimo la contaminación visual y afectar el terreno en la menor medida posible.

Figura 73. Lugar de instalación del sitio 2

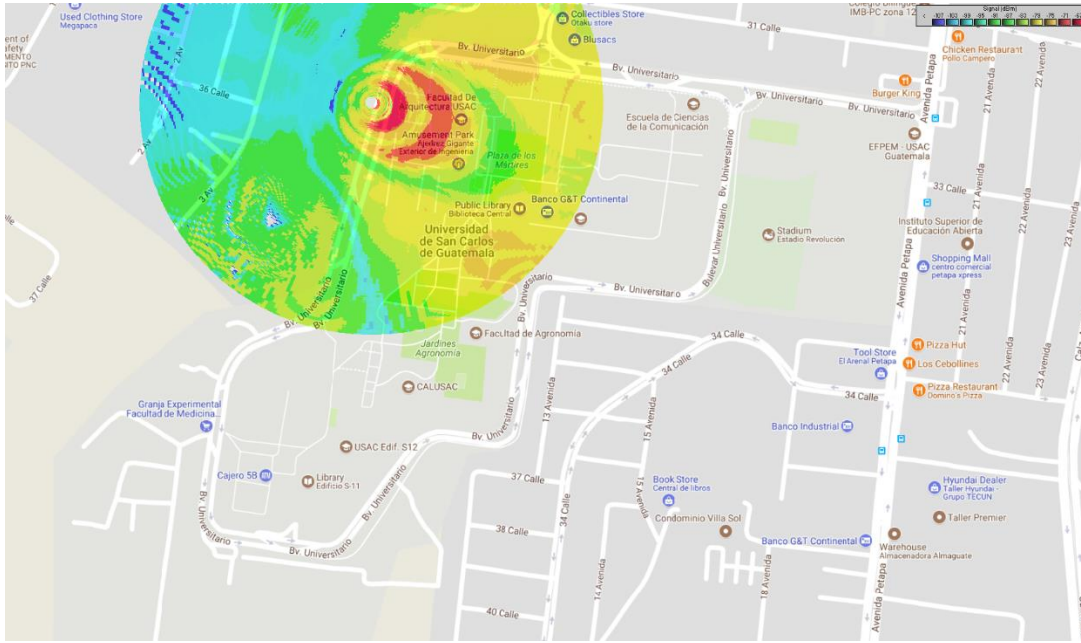


Fuente: Universidad de San Carlos, periférico externo.

5.4.2. Resultados de la simulación

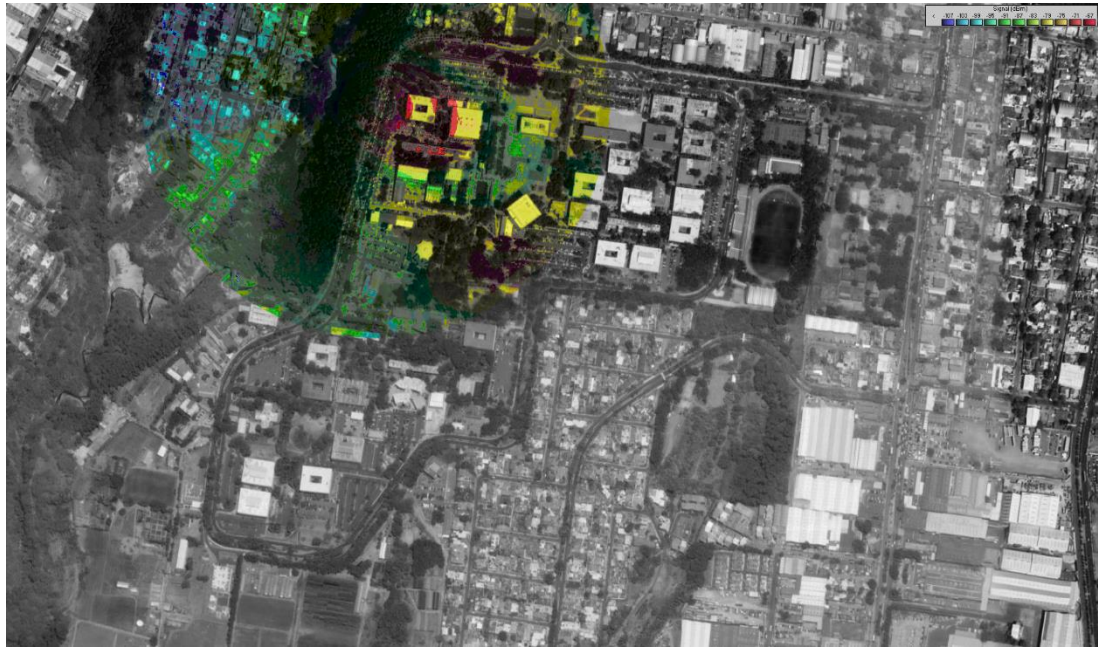
Nuevamente se computó la simulación de cobertura del sitio utilizando un radio del área afectada de 400 metros, que corresponde al radio del *campus* universitario (asumiendo un perímetro de 3 km). La codificación de colores utilizada es la misma del primer sitio propuesto y se encuentra detallada en la sección 5.3, en la figura 70.

Figura 74. Cobertura de sitio 2 con road maps



Fuente: elaboración propia, exportado del programa Radio Mobile.

Figura 75. Cobertura de sitio 2 con fotografías aéreas



Fuente: elaboración propia, exportado del programa Radio Mobile.

Como en el primer sitio, los resultados obtenidos en la simulación son satisfactorios, ya que el sitio propuesto brindaría cobertura al área sin cobertura que se presenta entre los edificios T1 y T2 de las facultades de Ingeniería y Arquitectura, respectivamente. Nuevamente, este sitio presenta una solución a la cobertura de cualquiera de los proveedores de servicio, adaptable a diferentes proveedores de antenas y ajustable a diferentes tipos de estructura o configuración.

En estos sitios únicamente se detalló un sector de cobertura, sin embargo, al realizar un estudio de la red, si se llegara a determinar que existen problemas de cobertura en sectores aledaños, puede implementarse dos antenas más (en el mismo sitio) que corrijan los niveles de cobertura en áreas que colinden con el *campus* universitario.

5.5. Adición de canales por expansión de usufructo de frecuencia de Telecomunicaciones de Guatemala, S. A.

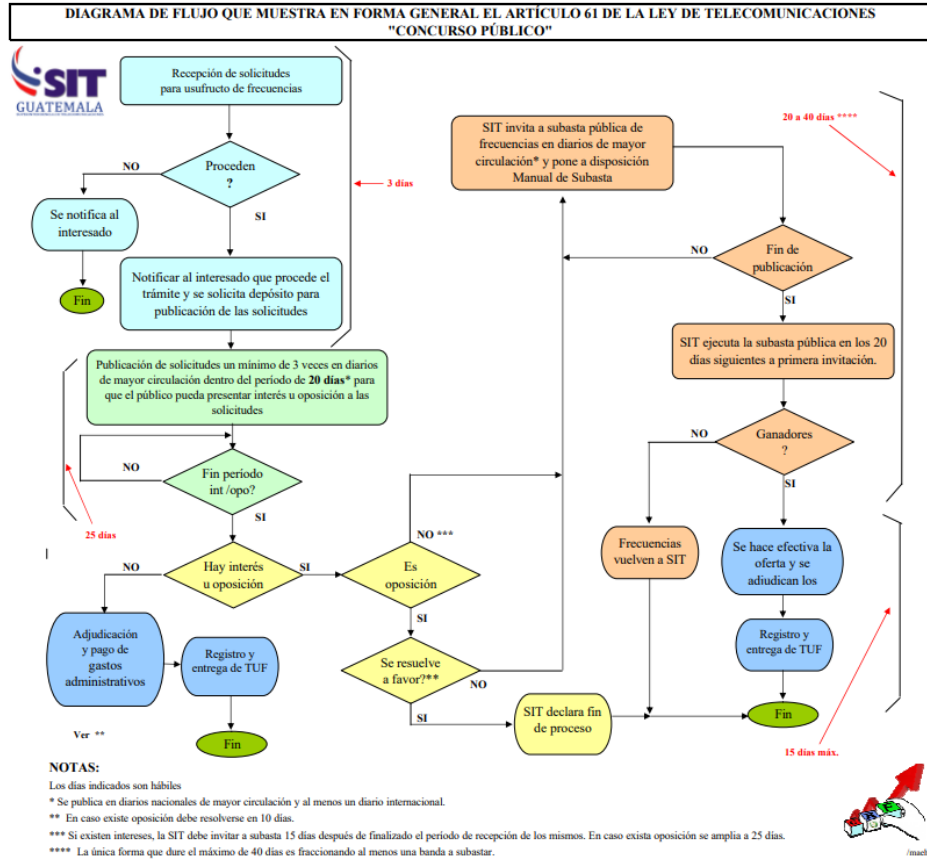
Junto con los sectores sin cobertura determinados dentro del *campus* universitario, se determinó que los valores ofrecidos en velocidades de carga y descarga por parte del proveedor Claro no son lo suficientemente altos para corresponder a valores típicos de conectividad LTE y, por lo tanto, se encuentran por debajo de los valores esperados en la telefonía actual.

La solución técnica consiste en adicionar frecuencias al usufructo actual de la empresa (ver tabla I, capítulo 1) que actualmente abarca un ancho de banda de únicamente 20 MHz. Sin embargo, la legislación de Guatemala establece en la Ley General de Telecomunicaciones, artículo 61, que “para la adjudicación de títulos de usufructo de frecuencias, cualquier persona interesada, individual o jurídica, nacional o extranjera, o cualquier entidad estatal, presentará ante la Superintendencia una solicitud detallando en ella las bandas de frecuencias y las características indicadas en la literal a) del artículo 57”. Por lo tanto, la adición de más canales o expansión del usufructo implica un proceso legal que a su vez implica una subasta pública en la que puede participar cualquier interesado.

Por lo tanto, para mejorar las tasas de transferencia es necesario adicionar frecuencias al usufructo de Telecomunicaciones de Guatemala, S. A., por lo que se debería presentar una subasta pública para la adjudicación de las mismas y la adición de estas a la infraestructura de red actual.

En la siguiente figura se detalla el proceso que debe seguirse para la participación en un concurso público de usufructo de frecuencias.

Figura 76. Concurso público para usufructo de frecuencias



Fuente: SIT. Diagrama de flujo. Artículo 61.

CONCLUSIONES

1. Los valores de las tasas de carga y descarga disminuyen por indisponibilidad de canales al igual que por falta de cobertura. Debe tenerse óptima cobertura y tráfico controlado para alcanzar los valores máximos.
2. Actualmente, no se encuentra garantizada la calidad de la cobertura LTE en el *campus* universitario. Existen diversos puntos en donde la intensidad de la señal es débil y, en general, las velocidades alcanzadas se encuentran por debajo de lo esperado para tecnologías de cuarta generación.
3. A lo largo del *campus* universitario el desempeño de cada proveedor de servicio es diferente en cobertura y *throughput*, por lo que cada uno debe realizar las acciones correctivas correspondientes para brindar un servicio con calidad uniforme en el área de cobertura.
4. Los datos registrados indican que el operador que actualmente posee una red más robusta a lo largo del *campus* universitario es Tigo, y que el operador que ofrece las tasas de transferencia máximas más altas es Movistar.

RECOMENDACIONES

1. Si se desea realizar correcciones sobre la red actual sin la adición de nuevos sitios, debe obtenerse los datos correspondientes a las redes desplegadas, mismos que únicamente puede brindar el operador respectivo. Además, conocer los datos del operador de red permitiría realizar una simulación más fiel de la cobertura incluyendo los demás sitios desplegados.
2. Previo a establecer un nuevo sitio, debe realizarse un estudio de impacto ambiental y tramitar las servidumbres en caso de no ser un área pública en la cual se puedan colocar estructuras libremente.
3. Para mejorar la calidad de los resultados, es necesario utilizar una terminal móvil especializada para *drive test* con software diseñado especialmente para esta labor.
4. Considerar las principales necesidades respecto a un servicio de telefonía móvil previo a elegir un operador y realizar una prueba de campo, ya que en diferentes regiones cada operador ofrece un servicio distinto que varía en cobertura y en tasas de transferencia efectivas.
5. Por parte de los proveedores de servicio, es útil establecer tarifas indexadas a la calidad del servicio, que tengan un valor base respecto a un nivel fijo de calidad y disminuyan al ser la calidad inferior a lo propuesto.

BIBLIOGRAFÍA

1. CHICOL CABRERA, Helmut Federico. *Consideraciones y análisis de la capacidad de tráfico de voz y datos para redes celulares CDMA*. Trabajo de graduación de Ingeniería Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 206p.
2. Congreso de la República de Guatemala. *Ley General de Telecomunicaciones*. Guatemala: Superintendencia de Telecomunicaciones. 2004.
3. DEL VALLE DÍAZ, Antonio. *Diseño, integración y optimización de estaciones base de segunda generación*. Trabajo de graduación de Ingeniería en Telecomunicaciones. Universidad de Sevilla, 2007. 181p.
4. DONIS, Mónica. *Usufructo de frecuencias*. Registro de Telecomunicaciones. Entrevista personal. 4 de julio de 2018.
5. Gerencia de Telefonía. Boletín estadístico del 2do semestre de 2017. Guatemala: Superintendencia de Telecomunicaciones. 2017.
6. *High speed packet access tutorial*. [en línea]. <https://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/3g-hspa/umts-high-speed-packet-access-tutorial.php>. [Consulta: 1 de febrero de 2018].

7. *LTE Alcatel white paper.* [en línea].
<https://archive.org/details/LTEAlcateWhitePaper>. [Consulta: 25 de febrero de 2018].
8. *LTE network architecture.* [en línea].
https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm.
[Consulta: 20 de febrero de 2018]
9. MORENO JIMÉNEZ, Cecilia. *Campaña de benchmarking: cobertura de telefonía móvil en entornos Indoor.* Trabajo de graduación de Ingeniería en Telecomunicaciones. Universidad de Sevilla. 165p.
10. NOHRBORG, Magdalena. *LTE Overview.* [en línea].
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>.
[Consulta: 20 de febrero de 2018].
11. PRIETO DONATE, Francisco. *Transmisión de imágenes de video mediante servicios web XML sobre J2ME.* Trabajo de graduación de Ingeniería Telemática. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Telemática, Universidad de Sevilla, 2007. 318p.
12. *¿Qué tipos de antenas existen? (III).* [en línea]. <https://radioslibres.net/20-que-tipos-de-antenas-existen>. [Consulta: 25 de julio de 2018].
13. RIOFRÍO CÓRDOVA, Andrés Anibal; VILLACÍS SANTILLÁN, Marcos Antonio. *Métodos de optimización de cobertura para redes celulares con tecnología GSM.* Trabajo de graduación de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional de Quito, 2007. 278p.

14. RODRÍGUEZ CARDEMIL, Samuel Ignacio. *Modelo de calidad de servicio para una red de datos HSDPA para el entorno local*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil Eléctrica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2009. 110 p.
15. SÁNCHEZ MARTÍNEZ, Rut. *3G systems WCDMA & CDMA*. Trabajo de graduación de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones. Escuela Politécnica Superior de Castelldefels, 2005. 79 p.
16. *UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE)*. [en línea]. ftp://ftp.3gpp.org/Inbox/2008_web_files/LTA_Paper.pdf. [Consulta: 25 de febrero de 2018].
17. WANNSTROM, Jeanette. *HSPA*. [en línea]. <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/99-hspa>. [Consulta: 1 de febrero de 2018].

