



**APLICACIÓN DE MODELO OKUMURA-HATA  
EN PROPAGACIÓN RADIO MÓVIL DE  
REDES 4G MEDIANTE SIMULACIÓN**

**Autores:**

Luque H. Daniel A.

Tatasciore B. Adriana F.

Urb. Yuma II, calle No 3. Municipio San Diego  
Teléfono: (0241) 8714240 (máster) – Fax: (0241) 8712394



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**APLICACIÓN DE MODELO OKUMURA-HATA EN PROPAGACIÓN  
RADIO MÓVIL DE REDES 4G MEDIANTE SIMULACIÓN**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**Autores:**

Luque H. Daniel A.

**C.I:** V-20.990.892

Tatasciore B. Adriana F.

**C.I:** V-20.293.062

**Tutor:**

Ing. Rainier Blanco

**C.I:** V-11.556.607



Universidad José Antonio Páez  
Facultad de Ingeniería

**FI-T -005-2019-1CE**

Valencia, 22 de Abril de 2019.

Ciudadano:  
Daniel Luque  
C.I:20.990.892  
Adriana Tatasciore  
C.I:20.293.062  
Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2019 de fecha 22-04-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado **APLICACIÓN DE MODELO OKUMURA-HATA EN PROPAGACIÓN RADIO MÓVIL DE REDES 4G MEDIANTE SIMULACIÓN** Presentado por usted como requisito para optar al título de Ingeniero en Telecomunicación.

Se ratifica la designación del Ing. Rainier Blanco, C.I:11.556.607 y la Ing. Alicia de Pizzella, C.I: 4.598.880 como Tutores Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. Luis Lira

Decano de la Facultad de Ingeniería



c. c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

L/lc.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

APROBACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero RAINIER BLANCO portador de la cédula de identidad N° V-11.556.607, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos, LUQUE HERRERA DANIEL ALEJANDRO portador de la cédula de identidad N° V-20.990.892 y TATASCIORE BLANCO ADRIANA FERNANDA portador de la cédula de identidad N° V-20.293.062, titulado **APLICACIÓN DE MODELO OKUMURA-HATA EN PROPAGACIÓN RADIO MÓVIL DE REDES 4G MEDIANTE SIMULACIÓN**. Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero de Telecomunicaciones, acepto la tutoría del mencionado proyecto durante su etapa de desarrollo hasta su elaboración y evaluación; según las condiciones de la Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad José Antonio Páez y sus correspondientes reglamentos.

En San Diego, a los 30 días del mes de Abril del año dos mil diecinueve.

Ing. Rainier Blanco

C.I: V-11.556.607

## **AGRADECIMIENTO**

**Luque H., Daniel A.**

A Dios,  
por siempre brindarme un día más para seguir adelante.

A mis padres,  
por su incondicional apoyo.

A la Universidad de Carabobo y a la Universidad José Antonio Páez,  
una por formarme, la otra por dar ese empujón extra.

Al resto,  
por influir de una forma u otra en este largo camino.

Por último, a mí mismo,  
por tanto esfuerzo y dedicación.

## **AGRADECIMIENTO**

**Tatasciore B., Adriana F.**

Gracias a mi Madre y Abuela por ser mi motivo de lucha para lograr mis metas y sueños en la vida, a ese ángel que desde el cielo me cuida y me bendice siempre mi Papá, que está orgulloso de este logro tanto como yo.

Gracias a mi compañero de tesis y gran amigo por acompañarme en esta larga carrera que hoy vemos los frutos de tanto esfuerzo. De igual manera a nuestro tutor por el tiempo dedicado para hacer posible este trabajo especial de grado.

Familiares y amigos que fueron testigos de tantas anécdotas y experiencias a lo largo de toda esta linda etapa, todos con su toque especial y único. Por ser mi apoyo e impulso en momentos difíciles donde veía este día inalcanzable.  
Gracias, por tanto.

Gracias a Dios, no me quedan dudas que no hay imposible por aquello que anhelamos. Insistir, persistir, resistir y nunca desistir.

## **DEDICATORIA**

**Luque H., Daniel A.**

A Marisol, mi madre,  
por darme la vida y por su apoyo incondicional.

A Adolfo, mi padre,  
por sus incansables palabras de aliento.

A Jamille, mi madrina,  
por siempre escuchar y estar presente.

## **DEDICATORIA**

**Tatasciore B., Adriana F.**

A Migray, mi madre,  
por su apoyo y siempre estar presente.

A Fernando, mi padre,  
por cada consejo y enseñanza en vida, te extraño.

A Clara, mi abuela,  
por siempre ser esa persona incondicional llena de amor.

## ÍNDICE GENERAL

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pp.</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>XV</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO</b>	
<b>I EL PROBLEMA</b>	
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema .....	4
1.3 Objetivos de la investigación .....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos .....	5
1.4 Justificación del problema.....	5
1.5 Alcance.....	5
<b>II MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Antecedentes .....	7
2.2 Bases teóricas .....	8
2.2.1 Evolución de las generaciones móviles.....	8
2.2.1.1 Generación cero (0G).....	9
2.2.1.2 Primera generación (1G).....	10
2.2.1.3 Segunda generación (2G).....	11
2.2.1.4 Tercera generación (3G) .....	12
2.2.1.5 Cuarta generación (4G).....	13

2.2.2 Evolución de las comunicaciones móviles.....	13
2.2.3 Requerimientos definidos por la ITU (Unión internacional de Telecomunicaciones).....	17
2.2.4 Introducción al estándar LTE.....	19
2.2.5. Arquitectura de un sistema LTE .....	36
2.2.5.1. EPC .....	38
2.2.5.2. E-UTRAN .....	38
2.2.5.3. UE (User Equipment, Equipo de Usuario).....	40
2.2.6. Bandas LTE.....	41
2.2.7 Modelos de propagación .....	42
2.2.7.1. Según el ambiente de propagación.....	43
2.2.7.2. Según el origen de los datos.....	44
2.2.8 Modelo Okumura-Hata .....	46
2.2.9. Geometría de las redes celulares.....	48
2.2.9.1. Limitación de frecuencia.....	51
2.2.9.2. Cálculo del radio de la celda .....	52
2.2.9.3. Distribución de frecuencias.....	53
2.2.10 Definición de términos básicos .....	54

### **III MARCO METODOLÓGICO**

3.1 Tipo de Investigación.....	58
3.2 Diseño de la Investigación .....	58
3.3 Nivel de la Investigación.....	59
3.4 Técnica e Instrumentos de Investigación .....	59
3.5 Fases Metodológicas .....	60

## **IV RESULTADOS**

4.1 Fase I: Estudio del modelo Okumura-Hata y sus variantes. ....	62
4.2 Fase II: Construcción de la formulación del modelo Okumura-Hata para las bandas de frecuencia 4G utilizadas en Venezuela. ....	67
4.3 Fase III: Simulación de la formulación construida. ....	73
4.4 Fase IV: Determinación de la propagación de la señal 4G con los resultados obtenidos de la simulación. ....	98
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>102</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>104</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>105</b>
<b>REFERENCIAS ELECTRÓNICAS</b> .....	<b>107</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Desarrollos TIC globales. ....	14
Figura 2. Tráfico Mensual Total de Voz y Datos Móviles 2012). ....	15
Figura 3. Tráfico Mensual Total de Voz y Datos Móviles 2017). ....	16
Figura 4. Evolución de las tasas de datos alámbricos e inalámbricos.....	17
Figura 5. Principio FDM.....	24
Figura 6. Ortogonalidad de las ondas portadoras.....	24
Figura 7. Espectro de la señal OFDMA .....	25
Figura 8. OFDMA vs. SCFDMA.....	28
Figura 9. Diagramas de los sistemas SISO, MISO y SIMO respectivamente .....	32
Figura 10. Diagrama de un sistema MIMO .....	32
Figura 11. Métodos FDD y TDD .....	34
Figura 12. Elementos de red LTE .....	37
Figura 13. Arquitectura de red LTE.....	37
Figura 14. Topología LTE y UMTS .....	40
Figura 15. Bandas de frecuencia y regiones correspondientes .....	41
Figura 16. Perfil de terreno con los parámetros de Okumura-Hata .....	46
Figura 17. Retícula de planificación .....	49
Figura 18. Clúster de 7 células.....	50
Figura 19. Células vecinas y colindantes .....	51
Figura 20. Distribución de frecuencias .....	54
Figura 21. Curva de atenuación relativa media para espacio libre en un área urbana.....	64
Figura 22. Factor de corrección para área sub-urbanas, áreas abiertas y cuasi abiertas. .....	65
Figura 23. Ubicación de las radiobases empleadas por Movistar en San Diego.....	68
Figura 24. Ubicación de las radiobases de Digitel más cercanas a la UJAP. ....	70
Figura 25. Ubicación 3D de la radiobase SANDIEGO1.....	71
Figura 26. Medición con Digitel en Cell Tower Locator.....	75

Figura 27. Medición con Digitel en G-NetTrack.....	76
Figura 28. Medición con Digitel en G-NetTrack.....	77
Figura 29. Medición con Digitel en G-NetTrack.....	78
Figura 30. Medición con Digitel en G-NetTrack.....	79
Figura 31. Medición con Digitel en G-NetTrack.....	80
Figura 32. Medición con Digitel en Network Cell Info.....	80
Figura 33. Medición con Digitel en Network Cell Info.....	82
Figura 34. Medición con Digitel en Network Cell Info.....	83
Figura 35. Medición con Digitel en Network Cell Info.....	84
Figura 36. Medición con Digitel en Network Cell Info.....	85
Figura 37. Medición con Digitel en Network Cell.....	86
Figura 38. Medición con Movistar en Cell Tower Locator.....	87
Figura 39. Medición con Movistar en G-NetTrack.....	88
Figura 40. Medición con Movistar en G-NetTrack.....	89
Figura 41. Medición con Movistar en G-NetTrack.....	90
Figura 42. Medición con Movistar en G-NetTrack.....	91
Figura 43. Medición con Movistar en G-NetTrack.....	92
Figura 44. Medición con Movistar en Network Cell.....	92
Figura 45. Medición con Movistar en Network Cell.....	94
Figura 46. Medición con Movistar en Network Cell.....	95
Figura 47. Medición con Movistar en Network Cell.....	96
Figura 48. Medición con Movistar en Network Cell.....	97
Figura 49. Medición con Movistar en Network Cell.....	98
Figura 50. Medición con Digitel de Cell Tower Locator.....	99
Figura 51. Medición con Digitel de Cell Tower Locator.....	100
Figura 52. Medición con Digitel de Cell Tower Locator.....	101

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación de las radiobases empleadas por Digitel en San Diego. ....	69
Tabla 2. Mediciones obtenidas de la BTS SANDIEGO1 con Cell Tower Locator....	76
Tabla 3 Mediciones obtenidas de la BTS UJAPSANDIEGO1 con G-NetTrack Lite.	77
Tabla 4. Mediciones obtenidas desde la Universidad José Antonio Páez por Network Cell Info.....	81
Tabla 5. Mediciones obtenidas desde la Universidad José Antonio Páez.....	88
Tabla 6. Mediciones obtenidas desde la Universidad José Antonio Páez.....	89
Tabla 7. Mediciones obtenidas desde la Universidad José Antonio Páez por Network Cell Info. ....	93



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**APLICACIÓN DE MODELO OKUMURA-HATA EN PROPAGACIÓN**  
**RADIO MÓVIL DE REDES 4G MEDIANTE SIMULACIÓN**

**Autores:** Luque H. Daniel A., Tatasciore B. Adriana F.

**Tutor:** Ing. Rainier Blanco.

**Fecha:** 2019.

**RESUMEN**

La importancia de la comunicación es ilimitada, cada vez que la sociedad da un paso más hacia el futuro esto representa un elemento clave en la evolución de las redes móviles. Al desarrollar nuevas tecnologías se mejoran las diversas formas de comunicación y los servicios que actualmente se utilizan con mucha frecuencia. La tecnología 4G (4ta Generación) es un estándar que tiene como objetivo lograr la convergencia entre redes alámbricas e inalámbricas mediante el uso de toda clase de dispositivos, además de optimizar el uso del espectro, reducir los costos, mejorar la calidad de servicio y brindar una mayor seguridad en la red. El siguiente trabajo de investigación emerge de acuerdo a la necesidad de realizar un estudio de cobertura de la reciente generación de telefonía móvil en el municipio San Diego implementando el modelo Okumura-Hata, analizando así la evolución de dicha tecnología, y a su vez permitiendo tener conexiones de banda ancha móvil con altas tasas de transferencia, dando a conocer además ciertos parámetros necesarios para el diseño de una red de cuarta generación. La metodología que se pretende utilizar se encuentra enmarcada en el paradigma cuantitativo con un diseño documental y nivel descriptivo, y cuya línea de investigación corresponde a los avances tecnológicos en tecnologías de información y comunicación.

**Descriptor:** Análisis de propagación, modelo Okumura-Hata, redes 4G.

## INTRODUCCIÓN

La red de acceso celular, a lo largo de su línea de tiempo, ha pasado de ser muy costosa, con un número limitado de suscriptores, a ser ampliamente accesible con un número de suscriptores que equivale a casi la mitad de la población mundial actual.

Cuando se trata de mejorar la comunicación móvil y mejorar los requisitos futuros, 4G (4ta Generación) es la mejor opción en redes de comunicación inalámbrica. Este proyecto fue iniciado por la 3GPP (3rd. Generation Partnership Project, Proyecto de Asociación de Tercera Generación) como una línea interna de estudio sobre la evolución de la red de acceso UMTS (Universal Mobile Telecommunications System, Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles), que reemplazaría a HSDPA+ (High Speed Downlink Packet Access, Acceso de Alta Velocidad a Paquete de Descarga), bajo la supervisión del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI). Entre los objetivos que persigue esta tecnología se encuentran: rentabilidad, mejor uso del espectro, mejor compatibilidad con otras normas y mejora de la eficiencia espectral.

Por otra parte, en términos de estructura LTE (Long Term Evolution, Evolución a Largo Plazo), la arquitectura de la red de banda ancha móvil difiere de las arquitecturas de procedimiento de 2G (2da Generación) y 3G (3era Generación). Por ejemplo, algunas unidades de la red de acceso, como el controlador de conmutación móvil MSC (Mobile Switching Controller, Controlador de Cambio Móvil) y el controlador de la red de radio RNC (Radio Network Controller, Controlador de Red de Radio), se eliminan en la red de acceso LTE, a diferencia de las redes de banda ancha móvil 2G y 3G, para satisfacer el requisito de una menor complejidad. Por lo tanto, los eNodeB (Evolved Node B, Nodo B Evolucionado) se han convertido en responsables de la gestión de los recursos de radio (RRM: Radio Resource Management, Gestión de Recursos de Radio), y los cuáles serán los

protagonistas en la investigación a continuación a partir de modelos de propagación establecidos.

Por lo tanto, el primer capítulo de la presente investigación se tratará el problema, englobando el planteamiento del mismo, y de los objetivos; la justificación del trabajo realizado y el alcance. En el segundo capítulo, el marco teórico, se pretenderá contextualizar la investigación, a través de la exposición de los factores que delimitarán el tema en cuestión. En el tercer capítulo se expondrá el marco metodológico, donde se explicará, desde el punto de vista teórico, la metodología de trabajo que se empleará para el desarrollo de la investigación en cuanto a actividades, productos esperados por cada etapa y técnicas a utilizar. Por último, en el cuarto capítulo, los resultados, donde se describirán las actividades llevadas a cabo para el cumplimiento de los objetivos.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del problema

Para lograr un entendimiento más preciso del tema que se desarrollará en el presente trabajo, se debe conocer la definición del término “modelos de propagación”, los cuales son modelos establecidos empleados en la medición de la pérdida de potencia de una señal que se propaga en un medio no confinado. Los modelos de propagación han ido evolucionando desde cálculos basados en métodos empíricos hasta complejos programas que emplean todo un algoritmo sobre mapas cartográficos.

Por otra parte, en las comunicaciones móviles es necesario garantizar un valor medio de campo eléctrico que delimite el área de cobertura. En los sistemas analógicos este valor viene determinado por la sensibilidad del receptor, las correcciones por ruido y multitrayecto, y la variabilidad estadística del campo debido a la ubicación y el tiempo. Por otro lado, en los sistemas digitales lo que se busca obtener es la relación (energía por bit) / (densidad espectral de ruido) para una tasa de errores deseada y teniendo en cuenta las condiciones del medio.

Desde el desarrollo de los primeros sistemas celulares se hizo imprescindible la reutilización de frecuencias a la hora de diseñar los sistemas móviles, debido a que se trata de un recurso espectral finito. Esto llevó a la necesidad de mejorar la precisión en el cálculo de la cobertura de cada transmisor, y así poder optimizar el uso del espectro de frecuencias. Para poder llevar a cabo este cometido se requería de procesos complejos y cálculos tediosos cuya resolución se convertía en una tarea cuanto menos improductiva, por lo que se comenzó a informatizar estos procesos de predicción.

Es por ello que una de las importantes consideraciones a tomar en cuenta en el estudio de cobertura de un sistema 4G es que los dispositivos finales (dispositivos móviles) que como su nombre lo recalca son móviles y pueden ubicarse en cualquier punto del área de cobertura, variando continuamente el trayecto de investigación. La telefonía móvil celular tiene una arquitectura básica a través de celdas, las cuales son zonas más pequeñas de un determinado radial, y que en cuyo centro se ubica una estación radioeléctrica denominada radio base. A una combinación de un grupo de celdas se le atribuye el término de clúster, dentro del cual se puede proporcionar servicio a un gran número de terminales móviles.

Dado que en la actualidad existe una amplia variedad de programas que se encargan de arrojar todos los datos necesarios para el estudio que se desea efectuar con el presente trabajo de investigación, y con la limitante de que la mayoría de dichos programas son pagos y en moneda extranjera, sumado a la inflación que atraviesa actualmente Venezuela, todo esto dificulta el coste de dichos softwares. Por otra parte, pocas son las herramientas informativas existentes sobre la cobertura de dichos sistemas, lo cual plantea dudas en la sociedad de porqué en ciertas ubicaciones del municipio se recibe señal 4G en los dispositivos móviles y porqué en otras ubicaciones se carece del servicio, saber si existen coberturas solapadas en dichas regiones lo cual dificultaría la recepción óptima de la señal.

## **1.2 Formulación del problema**

Para dar cumplimiento a las expectativas planteadas en el párrafo anterior los investigadores se preguntan:

¿Cómo aplicar el modelo Okumura-Hata en estudios de propagación radio móvil en redes 4G?

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 Objetivo general**

Aplicar el modelo Okumura-Hata en la propagación radio móvil de redes 4G.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Estudiar el modelo Okumura-Hata y sus variantes.
- Construir la formulación del modelo Okumura-Hata para las bandas de frecuencia 4G utilizadas en Venezuela.
- Simular la formulación construida.
- Determinar la propagación de la señal 4G con los resultados obtenidos de la simulación.

### **1.4 Justificación del problema**

Con cada paso que la humanidad da hacia el futuro, de cierta manera esto se traduce en evolución hacia la telefonía móvil, y con ello llega la necesidad de mejorar los servicios ofrecidos, ya que sus características lo convierten en la solución para los problemas de capacidad y conectividad.

Este proyecto permite analizar la pérdida de trayectoria en ciertas regiones del municipio San Diego que son cubiertas con el servicio 4G, tanto de Movistar como de Digitel, ya que Movilnet no dispone de dicho servicio, constatando el establecimiento de la conexión de bajada (downlink) con alguna de las estaciones bases, seleccionadas previamente, empleadas por ambas operadoras.

De igual manera, en las redes celulares, la estimación precisa de la pérdida de trayectoria (degradación en la potencia transmitida) es altamente deseable no solo para mejorar el rendimiento sino también para realizar una estimación precisa de la viabilidad financiera. En otras palabras, si bien la estimación precisa de la pérdida de trayectoria ayuda a lograr un rendimiento aceptable y un costo razonable, la estimación inexacta de dicha pérdida llevaría a degradar el rendimiento y/o aumentaría el costo del sistema.

### **1.5 Alcance**

El presente trabajo investigativo se centra en el estudio del modelo de propagación Okumura-Hata y no contempla el efecto de otros modelos que también pueden ser utilizados en el simulador como es el caso de los modelos Cost-Hata y

Longley-Rice. Por otra parte, el proyecto será realizado tomando como muestra el municipio San Diego, edo. Carabobo como área a cubrir.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

A continuación, se muestran los antecedentes, posteriormente las bases teóricas que sustentan el presente proyecto, complementado a su vez por la descripción de términos básicos para una adecuada comprensión del tema.

#### 2.1 Antecedentes

En primer lugar, se recopiló información de trabajos anteriores con fines similares a los del presente proyecto, como mencionan Quistial, Lupera, Tipantuña y Carvajal (2018), en su trabajo de grado titulado **“Modelo matemático adaptado para el cálculo de pérdidas de propagación en la banda de 900MHz para Microceldas en la ciudad de Quito”**, realizado en la Escuela Politécnica Nacional de Quito – Ecuador para la obtención del grado de Ingeniero Superior de Telecomunicación, en la cual presentan modelos para el cálculo de pérdidas de trayectoria basados en los modelos existentes de espacio libre, Okumura, Okumura-Hata, COST-231, Egli y Walfisch en ambientes con línea de vista y sin línea de vista, ajustados mediante el método del Error Cuadrático Medio y el ajuste simple, que pueden ser utilizados como referencia para el diseño de microceldas en la banda de 900 MHz en entornos urbanos de la ciudad de Quito considerando condiciones similares a las establecidas en las mediciones que se efectuaron.

Seguidamente, Mohamed I. (2017), en el artículo científico titulado **“Path-Loss Estimation for Wireless Cellular Networks Using Okumura/Hata Model”** publicado en la *Science Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, proporciona una línea de guía para el análisis de estimación de pérdida de trayectoria utilizando el modelo de Okumura-Hata. Se utilizó el software Matlab durante ese estudio para realizar el análisis, pero de igual manera las variables a considerar son las mismas. En comparación con el modelo de espacio libre en el que la frecuencia y

la separación son las únicas que contribuyen a la pérdida de trayectoria, pudo verificarse que se puede lograr una estimación más precisa cuando se utiliza Okumura-Hata como dispositivo móvil de altura.

Por otra parte, en el trabajo de fin de grado de García R., Francisco J. (2016), titulado “**Modelos de propagación para comunicaciones móviles 4G y 5G**”, realizado en la Universidad Politécnica de Madrid – España, para la obtención de Ingeniero de Telecomunicación, hace una recopilación de los modelos existentes empleados en redes 4G, tanto para el estándar LTE como para LTE Advanced y compara algunos de ellos para ver cómo se comportan en distintos escenarios los diversos parámetros establecidos en la transmisión de señal, para de esta manera tener alguna noción del comportamiento del modelo empleado y de otros derivados del mismo Okumura. De igual manera, presentan algunos de los modelos propuestos para la nueva generación 5G.

## **2.2 Bases teóricas**

A continuación, se describirán las bases teóricas de los distintos temas necesarios, para una buena comprensión y realización exitosa de la investigación.

### **2.2.1 Evolución de las generaciones móviles**

La necesidad del hombre de comunicarse a mayores distancias lo ha llevado a desarrollar diversos sistemas como el telégrafo o el teléfono. Estos, impulsados por los estudios de la electricidad, funcionaban mediante cables que se conectaban unos a otros.

Sin embargo, surgió la necesidad de una comunicación inalámbrica, lo que conllevó la utilización de ondas de radio para la primera transmisión telegráfica inalámbrica en el año 1901. El ancho de banda de estos sistemas era muy limitado por lo que las transmisiones de información eran muy lentas.

Desde entonces, los avances tecnológicos se dieron de una manera mucho más apresurada. Las posibilidades de comunicación se extendieron con la aparición de computadoras, satélites y posteriormente las redes de computadoras, que marcaron el origen de la Internet.

Entre los años 1940 y 1950 apareció el primer sistema que ofrecía servicio de telefonía móvil, el radioteléfono. Este sistema era severamente limitado por su poca movilidad, escasa capacidad, mal servicio y baja calidad de voz, además los equipos eran grandes, pesados, caros y susceptibles a interferencias.

#### **2.2.1.1 Generación cero (0G)**

Se podría decir que el comienzo de los teléfonos celulares puede atribuirse a la innovación en las cabinas de taxis, coches de policía y otros vehículos de servicio donde las radios de dos vías (Walkie-Talkie) se utilizaban para comunicarse entre sí o con una base central. En la generación cero aparecen los Mobile Radio Telephone (Teléfono Móvil de Radio) los cuales fueron los primeros teléfonos móviles que existieron, e incluían las tecnologías PTT (Push to Talk, Pulsar para Hablar), MTS (Mobile Telephone System, Sistema de Telefonía Móvil), IMTS (Improved Mobile Telephone Service, Servicio de Telefonía Móvil Mejorado) y AMTS (Advanced Mobile Telephone System, Sistema de Telefonía Móvil Avanzada).

Aunque realmente estos dispositivos no pueden ser considerados como teléfonos móviles, la implementación de los primeros supuso el comienzo de la evolución hacia los dispositivos que conocemos en la actualidad.

- **PTT:** Tal y como indica, la transmisión y recepción de voz utilizaba el mismo ancho de banda, limitándose a pulsar un botón para mandar la voz y a soltar el botón para recibir la voz. Fue un estándar muy popular y presente en la mayoría de equipos de radio. Algunos teléfonos móviles utilizaban una evolución denominada PoC (Push to Talk over Cellular, Pulsar para Hablar con el Teléfono Celular).
- **Sistema de Telefonía Móvil o MTS:** Asistido por una operadora para la transmisión y recepción. Para una llamada desde la red conmutada la llamada se encaminaba al operador móvil y este se encargaba de transferirla al teléfono móvil. Para efectuar una llamada saliente la llamada pasaba a través del operador móvil para poder poner en contacto a los usuarios.

Este servicio se originó con el sistema Bell y originalmente solo tenía 3 canales para todos los usuarios en el área metropolitana. Más licencias fueron agregadas posteriormente, llegando a tener 32 canales finalmente. Se utilizó hasta los años 80, momento en que fue sustituido por el protocolo IMTS.

- **IMTS:** Desarrollado a partir de los años 60 y tratando de mejorar los sistemas PTT, se implementó de forma que emisión y recepción se efectuaran en distintas bandas de frecuencia. Lamentablemente fue un fracaso ya que los transmisores requerían mucha potencia, provocando interferencias y con un número de canales muy reducido.
- **AMTS:** Estándar de telefonía móvil radial usado en los sistemas portátiles japoneses de radio. Operaba en la banda de los 900 MHz.

#### **2.2.1.2 Primera generación (1G)**

Durante la década de los años 70s, aparecieron a nivel comercial las comunicaciones móviles con su primera generación. Estas redes, conocidas como sistemas celulares, fueron un salto cualitativo en términos de capacidad y movilidad. Los equipos fueron más pequeños y livianos, pero siguieron transmitiendo únicamente información analógica de voz.

La evolución tuvo lugar de forma paralela en EE. UU y en Europa a principios de los años 80, cuando comenzaron a comercializarse los primeros sistemas celulares. En Estados Unidos surgió el sistema AMPS (Advanced Mobile Phone System, Sistema Telefónico Móvil Avanzado) que más tarde se convertiría en el sistema TACS (Total Access Communication System, Sistema de Comunicaciones de Acceso Total) en Europa. Sin embargo, el primer sistema de telefonía móvil tal y como se conocen ahora, fue el NMT (Nordic Mobile Telephone, Telefonía Móvil Nórdica) lanzado por Ericsson en 1981 en los países nórdicos, y su posterior evolución, el sistema NMT en 1986.

AMPS fue la tecnología que predominó en la primera generación de telefonía móvil, no fue hasta 1983 año en que fue comercializado el primer dispositivo

verdaderamente móvil, el cual tenía un peso de 800 gramos y unas dimensiones de 33 x 9 x 4,5 cm, se denominaba familiarmente “el ladrillo” y se convirtió en un codiciado artículo de lujo entre los ejecutivos y hombres de negocio que podían pagar \$3000 dólares por su adquisición.

### **2.2.1.3 Segunda generación (2G)**

La necesidad de mejorar la calidad de transmisión, la capacidad del sistema y la cobertura, llevó al desarrollo de los sistemas móviles de segunda generación. Con el avance tecnológico se hicieron posibles las transmisiones digitales. Aún dominaban las transmisiones de voz, pero las demandas de otros servicios, como fax, mensajería y transmisiones de datos, crecían rápidamente. En Estados Unidos la evolución del sistema AMPS culminó en la tecnología IS54 ó Digital AMPS (D-AMPS). Mientras tanto, en Europa, se dieron cuenta de la necesidad de definir un sistema que pudiese utilizarse en todos los países del continente empleando la tecnología digital, surgiendo así el estándar GSM.

Con GSM (Global System for Mobile Communication, Sistema global para las comunicaciones móviles) se dieron muchos cambios con respecto a su predecesora permitiendo así soportar altas velocidades de transferencia de información y voz; además, en esta generación se añaden otros servicios que facilitan la comunión entre usuarios como lo son: fax y SMS (Short Message Service, Servicio de Mensaje Corto) conocidos también como mensajes de texto.

Estos sistemas ofrecían voz digital a velocidades relativamente bajas y el poco ancho de banda restante para datos. A finales de los 90s se introdujo lo que llamamos 2.5G (GPRS: General Packet Radio Service, Servicio General de Paquetes Vía Radio) que permitía como mucho 80Kbps, y 2.75 (EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution, Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución del GSM)) con un máximo de conexión de 236Kbps, dos generaciones que cumplían con características intermedias entre la 2G y la 3G, presentando mejoras en la capacidad de transmisión de datos mediante el paso de la tecnología de conmutación de circuitos a la de conmutación de paquetes. Este cambio se da por el surgimiento de la Internet, el cual

trabaja con paquetes en lugar de circuitos, como las comunicaciones de voz de los sistemas 1G y 2G.

#### **2.2.1.4 Tercera generación (3G)**

La idea de un estándar que unifique la tecnología en todo el mundo impulsó la llegada de la tercera generación. Los equipos soportarían altas velocidades de hasta 2 Mbps, pero solo en interiores. Esta tecnología agregó facilidades de multimedia permitiendo aplicaciones de audio, video y gráficos al estilo de Internet. Soportaría transmisiones de datos por conmutación de circuitos y por conmutación de paquetes para garantizar la compatibilidad con otros sistemas móviles, en caso de que la 3G UMTS aún no estuviese implementado en algunas partes del mundo.

Al igual que ocurrió con las generaciones precedentes, entre la tercera y cuarta generación hubo una serie de mejoras sobre las redes 3G que aumentaron sus prestaciones y que son conocidas como generaciones intermedias (3.5, 3.75 y 3.9G)

La generación 3.5 (HSPA: High-Speed Packet Access, Acceso a Paquetes a Alta Velocidad), la cual es una fusión de dos protocolos móviles, HSDPA (High Speed Downlink Packet Access, Acceso a Descarga de Paquetes a Alta Velocidad) y HSUPA (High Speed Uplink Packet Access, Acceso a Subida de Paquetes a Alta Velocidad) es básicamente la 3G potenciada, es decir, diseñada para un mejor desempeño. Alcanza velocidades de transmisión descendente de hasta 14 Mbps teóricamente (throughput (rendimiento) promedio cercano a 1Mbps) y mayores velocidades en el enlace ascendente, de hasta 5.8 Mbps.

HSDPA lleva a las redes WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha) a su máximo potencial en la prestación de servicios de banda ancha, mediante un aumento en la capacidad de datos móviles, con throughput más elevado. De la misma manera en que UMTS incrementa la eficiencia espectral en comparación con GPRS, HSDPA lo hace en comparación con WCDMA.

A finales de 2008 se lanzó un estándar definido en la versión 7 de 3GPP y posteriores, HSPA+ (Evolved High Speed Packet Access, Acceso Evolucionado a

Paquetes a Alta Velocidad), el cual permitiría llegar a velocidades teóricas de datos tan altas como lo son 84Mbps en uplink (enlace de subida) y 22Mbps en downlink (enlace de descarga ó de bajada).

#### **2.2.1.5 Cuarta generación (4G)**

En 2008 la ITU (International Telecommunication Union, Unión Internacional de Telecomunicaciones) creó el IMT Advanced, que definía los requisitos que debían cumplir los nuevos estándares de comunicaciones móviles para ser considerados de 4G. Pese a que este organismo ha permitido ofertar tecnologías que no cumplen con todos sus requisitos (e.g. LTE), dos candidatos se presentaron para cumplir todos ellos e incluso superarlos, éstos eran LTE Advanced (4G+) y WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas).

La cuarta generación se basa totalmente en IP (Internet Protocol, Protocolo de Internet). Las velocidades de acceso o descarga son de 1 Gbps en reposo, de 100 Mbps en movimiento y hasta 50 Mbps para subida. Además, soporta QoS (Quality of Service, Calidad de Servicio) que permite ofrecer cualquier tipo de servicio en cualquier momento y lugar con un costo menor. La QoS prioriza el tráfico de datos dependiendo del tipo de aplicación que esté utilizando el ancho de banda, ajustando las necesidades a las circunstancias. Entre las aplicaciones se incluyen el acceso móvil a la Web, telefonía IP, servicios de juegos, TV móvil de alta definición, videoconferencias y televisión 3D.

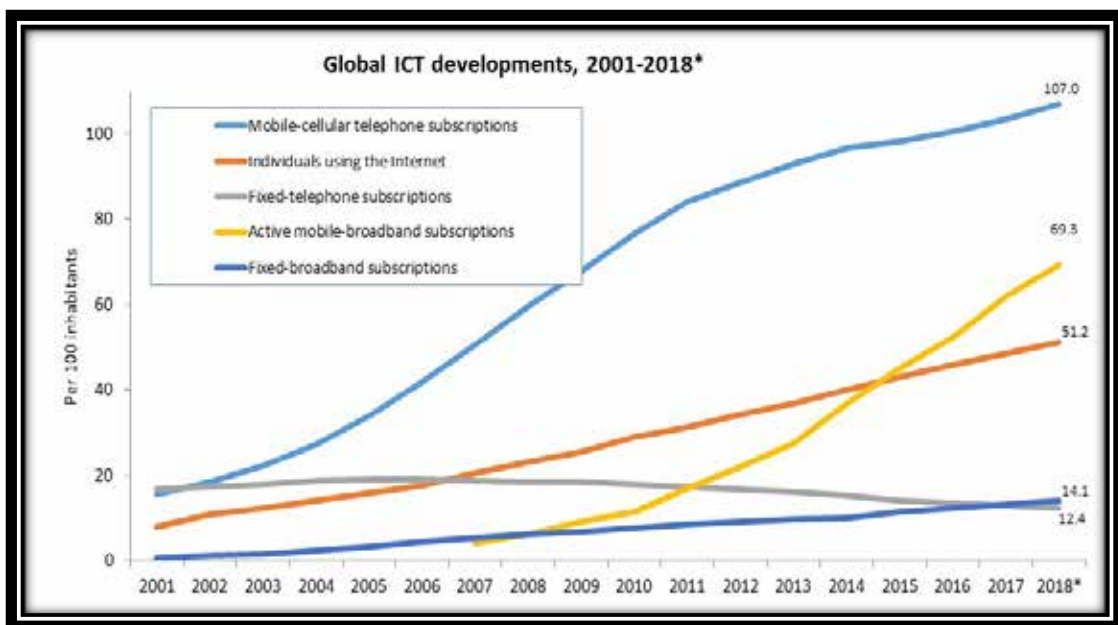
La ventaja sobresaliente de la 4G es que proporciona una velocidad de transferencia de datos con Internet mayor a cualquier servicio de las redes celulares existentes y, además, busca alcanzar las comunicaciones móviles de banda ancha.

#### **2.2.2 Evolución de las comunicaciones móviles**

Las tecnologías y la sociedad están en un continuo proceso de influencia mutua. Este es el caso específico de las comunicaciones móviles. Por un lado, las comunicaciones móviles tienen la capacidad de aumentar y facilitar las elecciones de

los usuarios. Por otro lado, las características propias de las comunicaciones móviles facilitan en mayor grado cierto tipo de comportamientos sociales.

Esta estrecha relación entre tecnología y sociedad es la que permite que en la actualidad las comunicaciones móviles sean las tecnologías que sufren una mayor demanda y a las que se les están dedicando más recursos para desarrollarlas al máximo. Es esta capacidad que tiene la tecnología móvil de llegar a tantas personas lo que ha hecho que su avance tecnológico en el tiempo sea tan rápido. Prueba de ello se observa en la **Figura 1**, que analiza la evolución de las suscripciones móviles a lo largo de los últimos años.



**Figura 1.** Desarrollos TIC globales.

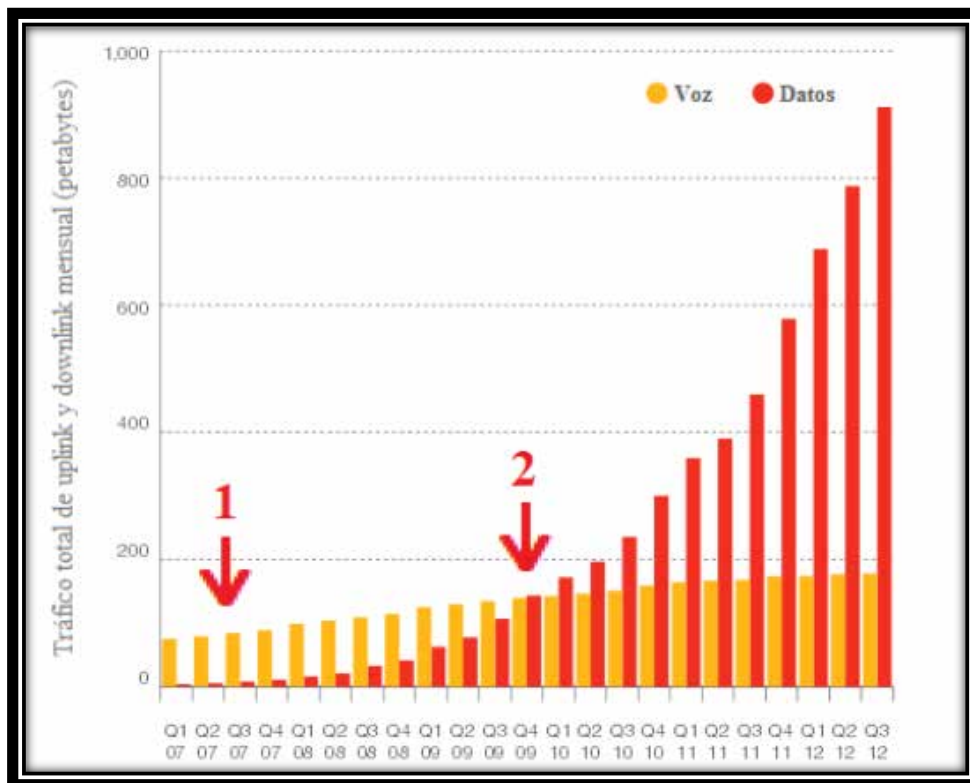
Fuente: ITU World Telecommunication/ICT Indicators database (2018).

Las transformaciones a las que las comunicaciones móviles han dado lugar deben entenderse como nuevas formas de conseguir sus objetivos para los individuos, las empresas y las administraciones. Incluso en muchos casos se trata de actividades que no habrían sido posibles sin la existencia de las comunicaciones móviles.

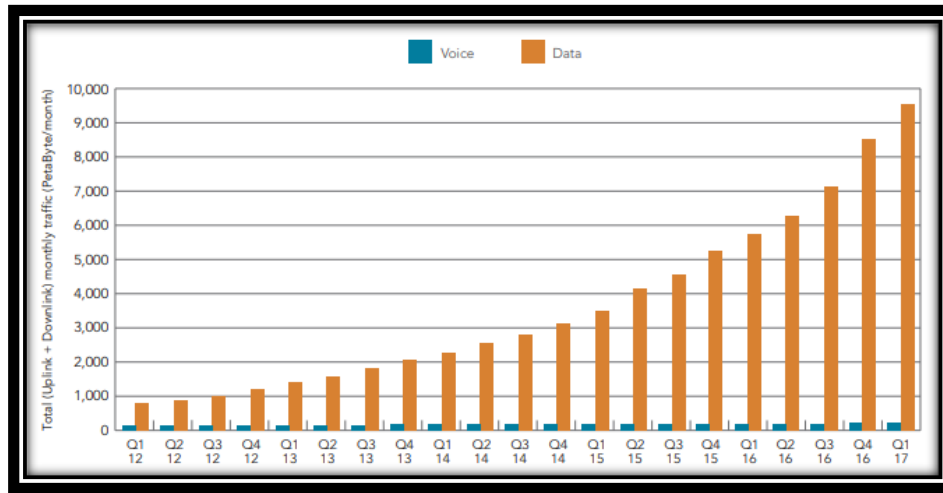
Este avance en las comunicaciones móviles ha permitido el desarrollo de dispositivos móviles cada vez más sofisticados, ágiles e intuitivos para los usuarios,

siendo capaces de ofrecer una amplia gama de aplicaciones y haciendo del teléfono móvil una herramienta indispensable en el uso cotidiano de la sociedad actual.

En la **Figura 2** se presenta un gráfico en el que se puede ver cómo ha crecido el tráfico de voz y de datos. Se muestran dos puntos importantes de esta evolución. El punto 1 representa los inicios del uso de datos con redes HSDPA. El crecimiento de tráfico de datos es lento en este punto, muy parecido al crecimiento que experimenta el tráfico de voz. En el punto 2 se puede ver el momento en que el volumen de datos excede al de la voz y comienza un crecimiento rápido, dejando atrás al tráfico de voz.



**Figura 2.** Tráfico Mensual Total de Voz y Datos Móviles 2012).  
Fuente: Ericsson's Mobility Report for November.



**Figura 3.** Tráfico Mensual Total de Voz y Datos Móviles 2017).  
Fuente: Akamai's [state of the internet].

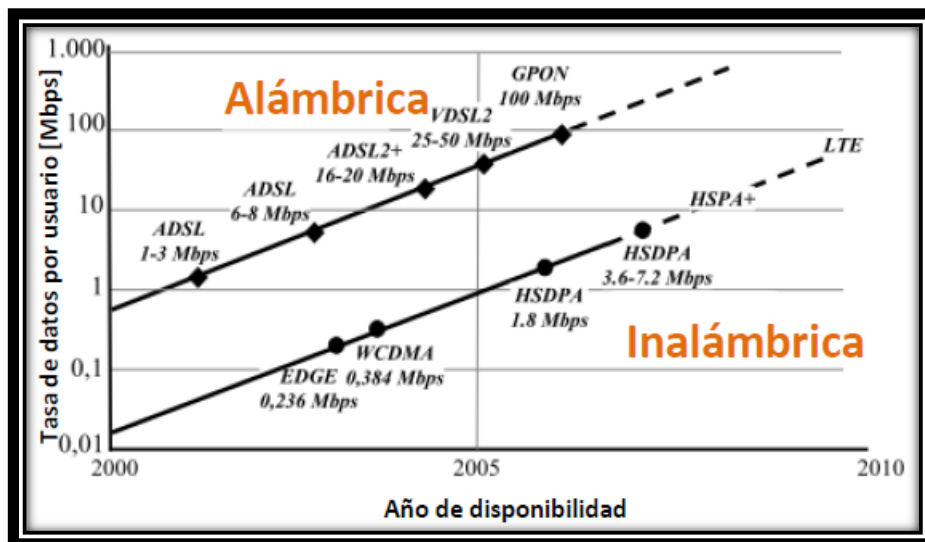
El tráfico de datos móviles ha seguido creciendo, y la **Figura 3** muestra el total de datos mensuales globales y el tráfico de voz desde el primer trimestre de 2012 hasta el primer trimestre de 2017, dando continuación al crecimiento exponencial mostrado en la **Figura 2**. Representa un fuerte aumento continuo en el tráfico de datos, con un crecimiento del tráfico de voz que ha disminuido a un solo dígito por año. El crecimiento en el tráfico de datos está siendo impulsado por el aumento de las suscripciones de teléfonos inteligentes y un aumento continuo en el volumen promedio de datos por suscripción, impulsado principalmente por la mayor visualización de contenido de video. En el primer trimestre de 2017, el tráfico de datos creció casi un 12% intertrimestral y casi un 70% interanual. Mirando el período completo de cinco años que se muestra en la **Figura 3**, el crecimiento acumulado del tráfico de voz fue del 28%, mientras que el crecimiento acumulado del tráfico de datos fue de más del 1.200%.

A pesar del creciente uso de datos y de la evolución que se ha experimentado con las redes inalámbricas, éstas aún proveen las tasas más altas. Esta evolución se presenta en la **Figura 4**. Se puede ver que ambas curvas son muy similares en su crecimiento y que tienen una diferencia de aproximadamente 30 veces. Las tasas

inalámbricas requieren un crecimiento más acelerado para alcanzar las velocidades que se ofrecen con la tecnología alámbrica. Esta evolución es indispensable ya que los usuarios, al estar acostumbrados a altas velocidades alámbricas, demandan las mismas en la tecnología inalámbrica.

La ventaja de los sistemas inalámbricos es la movilidad, es decir, tienen la capacidad de ofrecer un ancho de banda personal independientemente del lugar de ubicación. Esta ventaja hace que el acceso inalámbrico sea una opción muy atractiva para los usuarios y los proveedores del servicio.

Como corresponde, el número de suscriptores también ha aumentado notablemente y se calcula que para el año 2014 se alcancen los 3400 millones, de los cuales el 80% usarán banda ancha.



**Figura 4.** Evolución de las tasas de datos alámbricos e inalámbricos.  
Fuente: LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access.

### 2.2.3 Requerimientos definidos por la ITU (Unión internacional de Telecomunicaciones)

La ITU es el organismo de las tecnologías de información y comunicación comprometida a comunicar al mundo, continuamente elabora normas técnicas que garantizan la interconexión de redes y tecnologías. La IMT-2000 (International

Mobile Telecommunications for the year 2000, Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000) es una norma elaborada o conjunto de recomendaciones para los sistemas móviles de Tercera Generación (3G). Sirve de marco regulatorio para el acceso inalámbrico mundial, vinculando los diversos sistemas terrenales o de satélite.

El futuro de las IMT-2000 se encuentra definido en el término 4G para servicios móviles inalámbricos. Para ello la ITU ha desarrollado las Telecomunicaciones Móviles Internacionales-Avanzadas (IMT-Avanzadas) que son sistemas móviles dotados de nuevas capacidades superando a las IMT-2000.

En octubre del 2009 en la Asamblea de Radiocomunicaciones en Ginebra, mediante consenso se decide ampliar la familia de interfaces radioeléctricas 3G estableciendo las IMT-Avanzadas. Con la llegada de la 4G la ITU-R (División de radiocomunicaciones de la ITU) elaboró un documento denominado 4G/IMT en el cual se encuentran redactadas las normas para brindar servicios de Cuarta Generación. Los sistemas de IMT-Avanzadas (IMT-Advanced, IMT Avanzado) permitirán acceder a una amplia gama de servicios de telecomunicación, en especial los servicios móviles avanzados, admitidos por redes fijas y móviles, en los que se utilizan la transmisión por paquetes.

No se puede hablar de tecnologías de 3.5 o 3.8 como tecnologías 4G, hasta ahora la ITU ha definido las generaciones con números enteros y se ha puesto en claro que mientras no cumplan los requerimientos establecidos no pueden llamarse verdaderamente 4G. En diciembre del 2010 la ITU comunicó que WiMAX 4G, LTE-Advanced y HSPA+ se consideran tecnologías 4G.

El estándar IMT-Advanced (4G) requiere que se cumplan las siguientes especificaciones:

- Debe estar basado en una red de conmutación de paquetes todo-IP.
- Las velocidades de datos máximas deben ser de hasta 100 Mbps en situaciones de alta movilidad y de hasta 1 Gbps para aplicaciones de baja movilidad / estacionarias.

- Los recursos de la red deben utilizarse y compartirse dinámicamente para admitir a más usuarios en la misma conexión.
- El ancho de banda del canal debe ser escalable entre 5, 20 y hasta 40MHz.
- La eficiencia espectral no debe ser inferior a  $15\text{bit} / \text{s} / \text{Hz}$  y  $6.75\text{bit} / \text{s} / \text{Hz}$  para uso de enlace descendente y enlace ascendente exterior respectivamente.
- La eficiencia espectral no debe ser inferior a  $3\text{bit} / \text{s} / \text{Hz}$  y  $2.25\text{bit} / \text{s} / \text{Hz}$  para el uso de enlace descendente interior y enlace ascendente respectivamente.
- Las transiciones de conexión a través de redes heterogéneas deben ser suaves.
- Debe estar disponible una alta calidad de servicio para permitir la próxima generación de soporte multimedia en dispositivos móviles

#### **2.2.4 Introducción al estándar LTE**

LTE se destaca por su interfaz radioeléctrica basada en OFDMA, para el enlace descendente (DL) y SC-FDMA para el enlace ascendente (UL).

La red actual de telecomunicaciones inalámbricas se basa en una arquitectura de conmutación similar a la que se utiliza en las redes de telecomunicaciones de línea fija. Pero, con el advenimiento de las tecnologías IP y el enorme crecimiento del tráfico de datos, la industria inalámbrica está evolucionando sus redes hacia la tecnología IP.

Las comunicaciones inalámbricas empezaron como una rama de la telefonía fija por lo que no hubo normas globales que correspondieran a ellas. Así, los dos estándares que han dominado las comunicaciones móviles, TDMA/CDMA (Time Division Multiple Access / Code Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Tiempo / Acceso Múltiple por División de Código) (Norteamérica) y GSM (Europa), están basados en la telefonía fija.

A medida que se avanza hacia las tecnologías inalámbricas de tercera generación, crece la necesidad de elaborar normas más colaborativas y globales. Para hacer frente a este problema surgen los proyectos de cooperación 3GPP y 3GPP2 (3rd

Generation Partnership Project 2, Proyecto Asociación de Tercera Generación 2), los cuales se enfocan principalmente en el desarrollo de estándares para redes que funcionan solo a base de IP.

Tanto 3GPP como 3GPP2 convergieron hacia el uso de la tecnología CDMA, iniciada por la compañía Qualcomm, como la tecnología de base subyacente para los estándares 3G, aunque persisten algunas diferencias. Las tecnologías 3G desarrolladas por 3GPP se denominaron W-CDMA o UMTS y utilizaron una portadora de ancho de banda de 5 MHz, mientras que las tecnologías 3GPP2 se denominaron CDMA2000 y utilizaron una portadora de ancho de banda de 1.5 MHz. Ambos fueron avalados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) como estándares 3G, continuaron evolucionando con nuevas tecnologías de datos optimizados (3GPP2 EV-DO, 3GPP HSPA) y se han utilizado en todo el mundo.

A mediados de la década de 2000, cuando comenzó a aclararse que las redes 3G se verían abrumadas por la necesidad de un acceso más rápido a Internet, el trabajo comenzó en los estándares 4G. Los requisitos para 4G no solo eran velocidades de datos pico más rápidas que superaban los 100 Mbps, sino que también requerían que los sistemas 4G se construyeran de manera tal que fueran ideales para la transmisión de datos, lo que equivale a una arquitectura de conmutación de paquetes IP. Sobre la base de estos requisitos, tres organismos de estándares competentes trabajaron en soluciones potenciales para 4G.

La organización de estándares 3GPP trabajó en un sistema llamado Long Term Evolution (LTE), 3GPP2 comenzó a desarrollar su propia solución llamada UMB (Ultra Mobile Broadband, Banda Ancha Ultra Móvil), e IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica) comenzó a desarrollar un sistema llamado WiMAX. La banda ancha móvil, impulsada por estos estándares 3G y 4G LTE en evolución, ha tenido un tremendo impacto en la sociedad, la economía y la vida cotidiana.

## Ø 3GPP

3GPP está formado por un grupo de entidades de telecomunicaciones que colaboran para dar las especificaciones técnicas de los sistemas móviles pertenecientes a la tercera generación. Estos trabajan dentro del proyecto IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000, Telecomunicaciones Móviles Internacionales-2000) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, UIT.

El 3GPP desarrolla estándares de tercera generación para sistemas basados en GSM y las especificaciones en las que se enfoca son:

- RAN (Radio Access Networks, Redes de Acceso por Radio).
- SA (Service & Systems Aspects, Aspectos de Servicios y Sistemas).
- CT (Core Network & Terminals, Red de Núcleo y Terminales).
- GERAN (GSM EDGE Radio Access Networks, Redes de Acceso por Radio GSM y EDGE).

El enfoque principal para todas las versiones de 3GPP es hacer que el sistema, tanto el enlace ascendente como descendente, sea compatible en cualquier lugar para asegurar que el funcionamiento del equipo de usuario no tenga interrupciones.

Como un paso hacia las tecnologías 4G móviles de banda ancha inalámbrica, el organismo 3GPP comenzó su investigación inicial del estándar LTE como una tecnología viable en el año 2004.

Entre las ventajas sobre otras tecnologías inalámbricas actuales que se esperan de la tecnología LTE, está el aumento de los parámetros de rendimiento, como altas tasas máximas de datos, baja latencia y mayor eficiencia en el uso del espectro inalámbrico.

Una mejora en la comunicación es evidente en el hecho de que LTE permite a los usuarios usar un solo dispositivo para comunicaciones nacionales e internacionales, siempre y cuando en todos los países implicados se haya implementado esta tecnología. Además, LTE provee seguridad optimizada.

Las características y beneficios de LTE se listan a continuación.

- Alta eficiencia espectral.
- Menor latencia para conexiones rápidas y en tiempo real.
- Tasas de carga y descarga más veloces.
- Movilidad constante.
- Manejo de altas cargas de datos.
- Soporte de ancho de banda variable.
- Arquitectura de protocolo simple.
- Posibilidad de handover entre redes dispares incluyendo las redes móviles, redes de línea fija globales, de fibra óptica y privadas, manteniendo una calidad de servicio de alta seguridad.
- Compatibilidad e interoperabilidad con versiones anteriores 3GPP.
- Interacción con otros sistemas, por ejemplo, cdma2000.
- FDD y TDD en una tecnología de radio de acceso único.
- Eficiente multicast/broadcast (multidifusión/difusión).
- Una conexión de datos confiable y sin interrupciones.

### Ø **3GPP2**

Esta es una asociación similar a la 3GPP cuyo objetivo es desarrollar estándares de tercera generación para sistemas basados ya no en GSM sino en CDMA. Reúne los beneficios de un trabajo colaborativo. Las especificaciones técnicas en las que se enfoca la 3GPP2 son:

- TSG-A (Access Network Interfaces, Interfaces de Acceso a la Red).
- TSG-C (cdma2000, Tecnología CDMA2000).
- TSG-S (Services and Systems Aspects, Aspectos de Servicios y Sistemas).
- TSG-X (Core Networks, Redes de Núcleo).

La investigación para el avance hacia 4G por parte de 3GPP2 inicia con la evolución del sistema celular CDMA2000 UMB (Ultra-Mobile Broadband, Banda ancha Ultra Móvil).

La UMB ofrece muchas nuevas características y técnicas que le permiten cumplir con las expectativas de modo que pueda competir con otras tecnologías nuevas y emergentes.

- Las tasas de datos de más de 275 Mbps en el enlace descendente y sobre 75 Mbps en el enlace ascendente.
- Utiliza una interfaz OFDM/OFDMA aire.
- Utiliza acceso a radio FDD (Frequency División Duplexing, Duplexación por División de Frecuencia).
- Posee una arquitectura de red IP.
- Tiene un ancho de banda escalable entre 1,25 y 20 MHz (los sistemas OFDM/OFDMA son muy adecuados para anchos de banda amplios y escalables).

#### Ø **OFDM**

La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM: (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) consiste en varias portadoras espaciadas de tal forma que, a pesar de que sus espectros se cruzan, no causan interferencias unas en otras. Se pueden enviar varias ondas portadoras (múltiples señales) simultáneamente en frecuencias distintas, de esto nace la necesidad de una división de frecuencias.

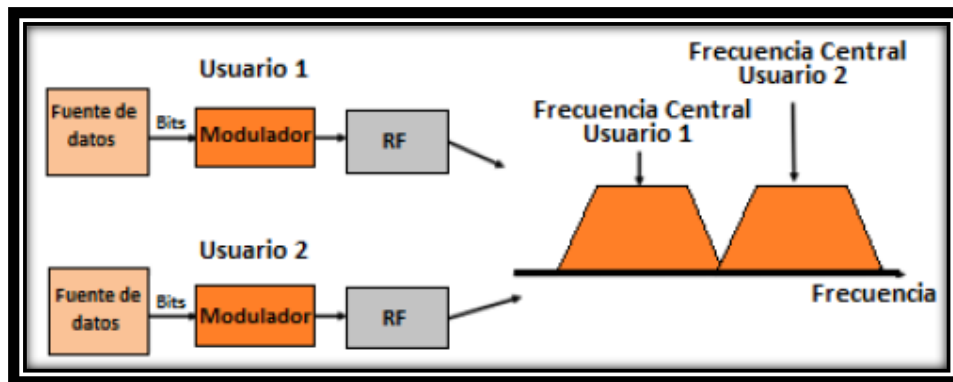
Para la división del espectro, es necesario dejar un espacio antes y otro después de cada frecuencia portadora para que no haya interferencias entre ellas. A estos espacios se les llama bandas de guarda.

La OFDM tiene a la FDM como principio. En la FDM los datos de un usuario se transmiten constantemente en una sola frecuencia como se muestra en la figura 5, mientras que con la OFDM los datos se dividen y se transmiten continuamente por varias sub-portadoras de menor capacidad.

Como se explicó anteriormente, las señales podrían interferir unas con otras si no se da una banda de guarda adecuada para cada frecuencia portadora que evite que

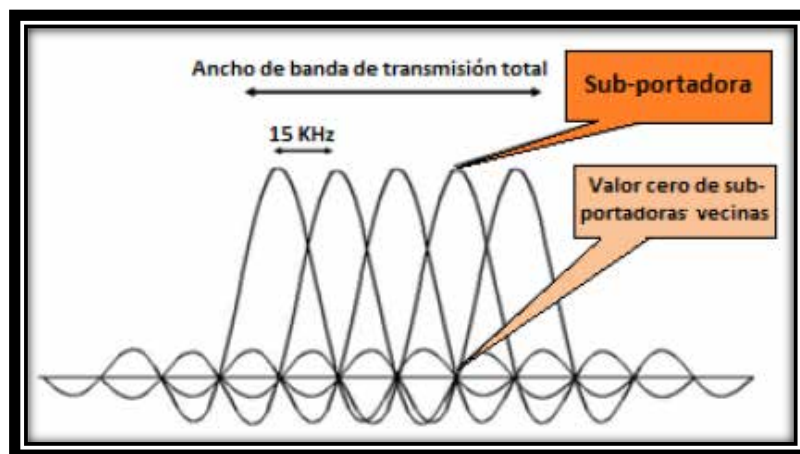
se superpongan (ver **Figura 5**). La ortogonalidad de las frecuencias permite que estas bandas sean innecesarias.

En OFDM se crean sub-portadoras cuyas ondas se puedan superponer sin causar interferencias. Las frecuencias centrales son seleccionadas con una diferencia de espacio específica que hace que las ondas portadoras tengan el valor de cero en las frecuencias centrales de las vecinas, como se muestra en la **Figura 6**.



**Figura 5.** Principio FDM.

Fuente: Estado actual de las redes LTE en Latinoamérica.



**Figura 6.** Ortogonalidad de las ondas portadoras.

Fuente: Estado actual de las redes LTE en Latinoamérica.

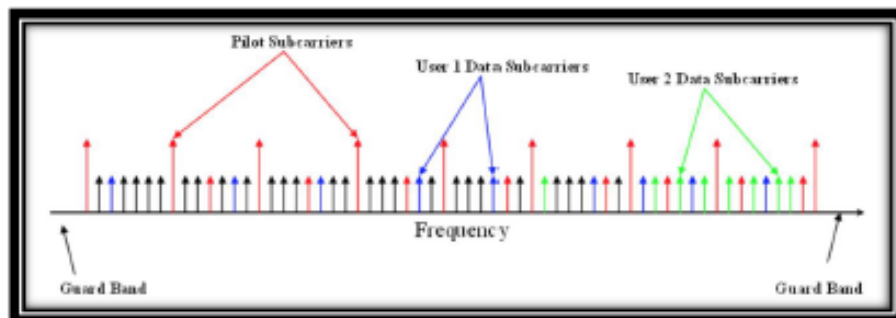
La diferencia que 3GPP eligió para las frecuencias portadoras es de 15 KHz, y como alternativa en las siguientes especificaciones se planteó una distancia de 7.5 KHz entre portadoras.

### Ø OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

El OFDMA, que traducido significa Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales, es una elaboración de la OFDM utilizada por LTE y otros sistemas que incrementa la flexibilidad del acceso de los usuarios al sistema mediante la multiplexación de varios usuarios en las mismas sub-portadoras.

El OFDMA es utilizado para el enlace descendente con el objetivo de contrarrestar la interferencia de multitrayectoria en el canal de radio y proveer una mayor eficiencia espectral ya que no se necesitan bandas de guarda.

Esta técnica ofrece la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pertenezcan a usuarios distintos. Por tanto, permite alojar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en subportadoras diferentes.



**Figura 7.** Espectro de la señal OFDMA.

Fuente: Wikipedia.org.

El acceso múltiple se consigue dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios. El sistema se realimenta con las condiciones del canal, adaptando continuamente el número de subportadoras asignadas al usuario en función de la velocidad que éste necesita y de las condiciones del canal. Si la asignación se hace rápidamente, se consigue cancelar de forma eficiente las interferencias co-canal y los desvanecimientos rápidos. En la **Figura 7** se muestra una representación del espectro de la señal OFDMA.

A modo de anotación, cabe decir que no es necesario que las subportadoras sean contiguas, los símbolos de un usuario pueden estar distribuidos sobre subportadoras no contiguas.

Esta técnica de acceso presenta bastantes ventajas, de las cuales se podrían considerar las siguientes como principales:

- **Diversidad multiusuario:** La asignación de subportadoras se realiza de manera dinámica. Como el canal radio es inestable, presentará desvanecimientos aleatorios en las diferentes subportadoras, se puede seleccionar para cada subportadora el usuario que presente un mejor estado del canal. Así se consigue una mayor velocidad de transmisión y una mayor eficiencia espectral. No obstante, hay diferentes criterios para la asignación de subportadoras, uno de ellos es el denominado scheduling que ha aparecido en ocasiones anteriores.
- **Diversidad frecuencial:** Cabe la posibilidad de asignar a un mismo usuario subportadoras no contiguas, separadas suficientemente como para que el estado del canal en las mismas sea independiente, lo que nos proporciona diversidad frecuencial en la transmisión de dicho usuario ante canales selectivos en frecuencia.
- **Robustez frente al multitrayecto:** Gracias a la utilización de un prefijo cíclico, esta técnica es muy robusta frente a la interferencia intersimbólica (ISI), resultante de la propagación multitrayecto y se puede combatir la distorsión mediante técnicas de ecualización en el dominio de la frecuencia, que resultan menos complejas que las que se realizan en el dominio del tiempo.
- **Flexibilidad en la banda asignada:** Esta técnica de acceso múltiple proporciona una forma sencilla de acomodar diferentes velocidades de transmisión a los diferentes usuarios en función de las necesidades de servicio

requeridas por cada usuario, simplemente asignando más o menos subportadoras a cada usuario.

- **Elevada granularidad en los recursos asignables:** Como se subdivide la banda total en un conjunto elevado de subportadoras de banda estrecha que se asignan dinámicamente a los usuarios, se dispone de una elevada granularidad a la hora de asignar más o menos recursos a cada uno, lo que facilita acomodar servicios con diferentes requisitos de calidad.

También presenta algunos inconvenientes. Estos son los más destacables:

- **Poca eficiencia en el consumo de potencia:** La relación entre potencia de pico envolvente de la señal y la potencia media, PAPR (Peak Average Power Ratio, Relación de Potencia Pico Promedio), es muy elevada, lo que obliga a utilizar amplificadores de alta linealidad.
- Es muy sensible a los offsets de frecuencia y al ruido de fase.
- Aunque presenta robustez frente al multitrayecto gracias al prefijo cíclico, el uso de este genera una reducción en la velocidad de transmisión.

#### Ø SC-FDMA

Para el enlace ascendente, LTE se basa en la técnica SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Simple).

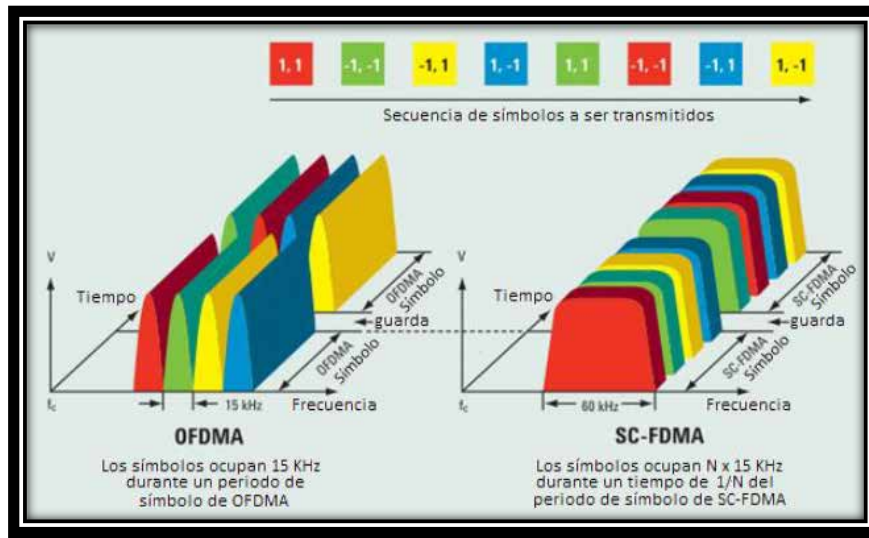
Esta técnica es una variante de la OFDM con la diferencia de que permite un menor consumo de energía y el uso de amplificadores menos costosos en el terminal.

El amplificador de radiofrecuencia que transmite las señales hacia las antenas de la estación base es el elemento de mayor potencia por lo que es necesario que este trabaje de la manera más eficiente con un nivel de potencia constante.

Desafortunadamente la OFDM tiene picos de potencia que en la estación base no representa un problema, pero es inaceptable para un móvil. Por eso LTE utiliza el esquema de modulación SC-FDMA para la comunicación del móvil a la estación

base. Esta técnica combina los picos bajos que ofrecen los sistemas de portadora simple y la disminución de la interferencia por multitrayectoria que ofrece la OFDM.

Como una comparación entre los métodos utilizados para los enlaces descendente y ascendente se presenta la **Figura 8**.



**Figura 8.** OFDMA vs. SCFDMA.

Fuente: A Comparison of Uplink Scheduling in OFDMA and SCFDMA.

El ejemplo que se presenta utiliza solo cuatro sub-portadoras y dos periodos de transmisión. Las señales LTE reales están asignadas en unidades de 12 sub-portadoras adyacentes (180 KHz) llamadas bloques de recursos. Cada bloque dura 0.5 ms y usualmente contienen 7 periodos de transmisión.

SC-FDMA presenta una mala PAPR, no obstante, ese problema se soluciona con amplificadores de alta linealidad, aunque esto requiera el consumo de más potencia. Sin embargo, en el terminal del usuario es crítico reducir el consumo de potencia, por lo que se utiliza una técnica de acceso de portadora única.

Es una nueva técnica de modulación híbrida, que combina la robustez frente a la propagación multicamino y flexibilidad de ubicación de las subportadoras propia de los sistemas OFDM con menor PAPR propia de las modulaciones con portadora única.

Esta tecnología reduce el nivel de los picos de potencia en el dominio del tiempo, pero aumenta la potencia radiada fuera de banda en el dominio frecuencial. También genera una pérdida de sensibilidad entre 2 y 3 dB en canales con desvanecimientos.

Al lado izquierdo se pueden ver las N sub-portadoras de 15 KHz cada una. En este ejemplo son 4 sub-portadoras y por eso se toman 4 símbolos en paralelo.

Después de que ha pasado un periodo de símbolo, se inserta un periodo de guarda y luego los siguientes 4 símbolos se transmiten en paralelo. Por facilidad, el periodo de guarda se muestra como un espacio, no obstante, durante este periodo se transmite una copia del final del siguiente símbolo para evitar la interferencia intersimbólica.

Como se puede ver, a diferencia del OFDMA, el SC-FDMA transmite los símbolos de forma serial, ocupando un ancho de banda de  $N \times 15$  KHz, en donde N es el número de sub-portadoras que se utilizarían en la OFDM. De forma visual se distingue claramente que el OFDMA utiliza múltiples portadoras y el SC-FDMA utiliza una sola.

La transmisión paralela de varios símbolos es lo que crea los picos de potencia no deseados en el OFDMA. Al transmitir los mismos símbolos en forma serial, el ancho de banda ocupado por el SC-FDMA es el mismo que en el OFDMA, pero los picos no varían de los símbolos originales.

Con comparación a OFDMA:

- Bajo PAPR (factor de cresta).
- Más robusto ante los valores nulos del espectro.
- Sensibilidad menor al offset de la frecuencia portadora.
- Complejidad menor del transmisor.

#### Ø MIMO

MIMO (Multiple Input Multiple Output, Entrada Múltiple Salida Múltiple) es una tecnología que se refiere específicamente al uso de múltiples señales que viajan

simultáneamente y a la misma frecuencia por un solo canal de radiofrecuencia, y que aprovecha la propagación multicamino para incrementar la eficiencia espectral de nuestro sistema de comunicaciones inalámbrico. Esto lo consigue a través del uso de diversidad de antenas, distintas técnicas y complejos algoritmos de tratamiento digital de señales en ambos extremos del enlace: extremo transmisor (múltiple entrada) y extremo receptor (múltiple salida).

Antes del desarrollo de MIMO, los sistemas de comunicaciones inalámbricos veían en la propagación multicamino un gran inconveniente que debía de ser solventado, pero MIMO es la primera tecnología que trata el multicamino como una característica inherente al sistema que hay que aprovechar para poder multiplicar su capacidad. Esto permitirá incrementar extraordinariamente la velocidad, el caudal efectivo, el rango, la capacidad y la fiabilidad de nuestro sistema y todo esto sin un incremento del ancho de banda o de la potencia transmitida. Por ejemplo, dispositivos de WLAN (Wireless Local Area Network, Red de Área Local Inalámbrica) que implementan MIMO han demostrado en tests de laboratorio su capacidad de cubrir áreas de cobertura al menos dos veces más grandes que la que cubren dispositivos convencionales, aumentando también la velocidad y disminuyendo la probabilidad de error.

En resumen, MIMO aumenta la eficiencia espectral de un sistema de comunicación inalámbrica por medio de la utilización de técnicas de diversidad espacial y de complejos algoritmos de procesamiento digital de señales.

Se habla de diversidad cuando se tienen múltiples copias de la señal transmitida, y según dónde se produzca esta diversidad, se distinguen las siguientes clases:

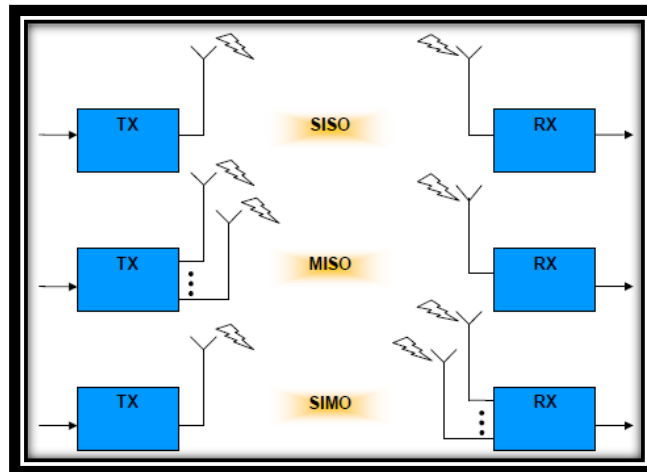
- **Diversidad en el tiempo**, cuando transmiten varias versiones de la misma señal en instantes diferentes.

- **Diversidad en la frecuencia**, cuando la señal es transmitida usando distintos canales de frecuencia. Un ejemplo sería OFDM o las técnicas de espectro expandido.
- **Diversidad en el espacio**, cuando se utilizan caminos de propagación diferentes para transmitir la señal. En comunicaciones inalámbricas esto se consigue mediante diversidad de antenas, es decir, usando varias antenas transmisoras (diversidad en transmisión) y/o varias antenas receptoras (diversidad en recepción).
- **Diversidad de polarización**, cuando múltiples copias de la señal son transmitidas con polarizaciones distintas.

Según el número de antenas que se encuentran en ambos extremos del enlace de comunicación se pueden distinguir los siguientes sistemas, los cuales pueden considerarse puntos de partida de la tecnología MIMO:

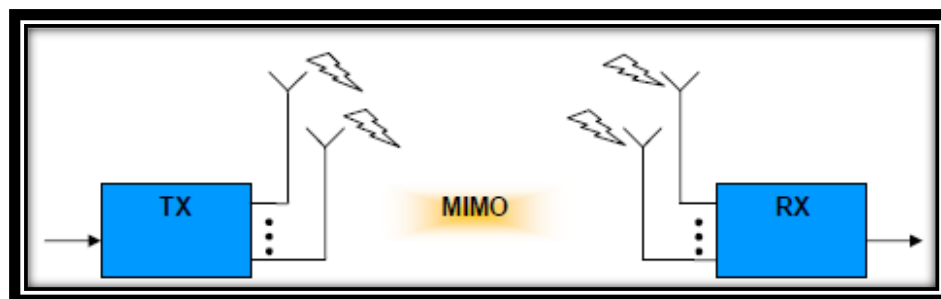
- **SISO** (Single Input, Single Output; Entrada Única, Salida Única): sistema de comunicaciones que utiliza una sola antena transmisora y una sola antena receptora.
- **MISO** (Multiple Input, Single Output; Entrada Múltiple, Salida Única): sistema de comunicaciones que utiliza dos o más antenas transmisoras, pero sólo una antena receptora. También se le conoce como diversidad en transmisión.
- **SIMO** (Single Input, Multiple Output; Entrada Única, Salida Múltiple): sistema de comunicaciones que utiliza una sola antena de emisión y dos o más antenas receptoras. Se le conoce como diversidad en recepción.

Se observará en la **Figura 9**:



**Figura 9.** Diagramas de los sistemas SISO, MISO y SIMO respectivamente.  
 Fuente: Diseño de laWLAN deWheeler Lane Technology College.

Atendiendo a esta clasificación MIMO (ver **Figura 10**), representará entonces un sistema de comunicaciones que utiliza dos o más antenas en el extremo transmisor, y dos o más antenas en el extremo receptor. Es decir, utilizará diversidad en el espacio a través del uso de varias antenas tanto en transmisión como en recepción.



**Figura 10.** Diagrama de un sistema MIMO.  
 Fuente: Diseño de laWLAN deWheeler Lane Technology College.

Durante años, los ingenieros asumieron que los límites de capacidad del canal teórico estaban definidos por el teorema de Shannon-Hartley:

$$C = BW \log_2(1 + SNR) \quad (1)$$

Donde:

- C: Capacidad del canal
- BW: Ancho de banda
- SNR: Relación señal a ruido

Como muestra la Ecuación (1), la forma tradicional de lograr mayores velocidades de datos es aumentando el ancho de banda de la señal. Desafortunadamente, aumentar el ancho de banda de la señal de un canal de comunicaciones al aumentar la tasa de símbolos de una portadora modulada aumenta su susceptibilidad al desvanecimiento por trayectos múltiples.

Es por ello que, usando este conocimiento del canal, un receptor puede recuperar flujos independientes de cada una de las antenas del transmisor. Un sistema MIMO de 2 x 2 produce dos flujos espaciales para duplicar efectivamente la velocidad de datos máxima de lo que podría lograrse en un canal de comunicaciones SISO 1 x 1 tradicional.

Si bien existen múltiples métodos para aproximar la capacidad máxima del canal de un sistema MIMO, la capacidad del canal se puede estimar en función de N flujos espaciales. Una aproximación básica de la capacidad del canal MIMO es una función de los flujos espaciales, el ancho de banda y la relación señal-ruido (SNR) y se muestra en la ecuación (2):

$$C = N \times Bw \log_2(1 + SNR) \quad (2)$$

Donde:

- C: Capacidad del canal
- BW: Ancho de banda
- SNR: Relación señal a ruido
- N: Cantidad de flujos espaciales

#### Ø TDD y FDD

FDD es el acrónimo de División de Duplexación por Frecuencia (equivalente a Full-Duplex, Duplex Completo), que significa que el radio transmite y recibe datos al mismo tiempo, logrando así alto rendimiento y latencia muy baja. Una analogía a

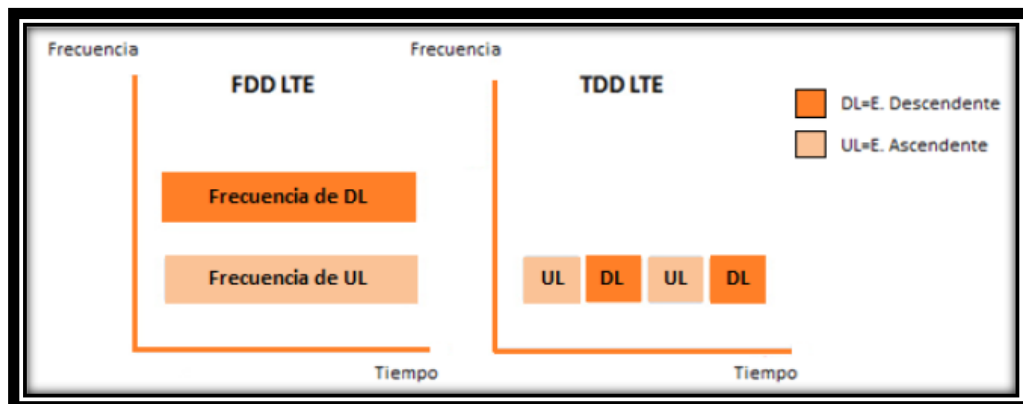
este modo es una llamada telefónica, específicamente cuando uno está escuchando y hablando por teléfono al mismo tiempo, asumiendo claro que uno es capaz de hacer ambas cosas al mismo tiempo de manera eficiente. En este protocolo, cada canal se utiliza únicamente para transmitir datos en una sola dirección, y se suele usar en enlaces simétricos.

Las técnicas de duplexado identifican los enlaces ascendente y descendente en un sistema celular. A pesar de que son métodos muy distintos, LTE soporta ambas técnicas.

En el FDD los enlaces ascendente y descendente están separados, por lo que transmiten datos simultáneamente operando en diferentes frecuencias como se muestra en la **Figura 11**. En el FDD la transmisión es continua.

TDD es el acrónimo de División de Duplexación por Tiempo (equivalente a Half-Dúplex, Medio Duplex), lo que significa que el radio puede transmitir o recibir datos, pero no realizar ambas acciones al mismo tiempo. Es importante recordar que los enlaces Half-Duplex siguen siendo bidireccionales, pero el radio debe dejar de transmitir para escuchar, y viceversa. Una analogía para este modo es la antigua comunicación por cartas

En el TDD ambos enlaces se encuentran en una misma frecuencia, pero se transmiten por turnos, lo que hace que la transmisión sea discontinua.



**Figura 11.** Métodos FDD y TDD.  
Fuente: [DifferenceBetween.com](http://DifferenceBetween.com)

El FDD es más eficiente y representa mayor volumen de dispositivos e infraestructura. Sin embargo, el TDD es preferido por la mayoría de implementaciones debido a su flexibilidad para escoger las tasas de transferencia de datos de los enlaces según convenga, capacidad de explotar la reciprocidad del canal, capacidad de implementación en una banda no dividida y el diseño del transceptor es menos complejo.

LTE ofrece la posibilidad de utilizar los recursos tanto en tiempo como en frecuencia, permitiendo el soporte de múltiples usuarios en un intervalo de tiempo. En cambio, la tecnología existente de 3G utiliza los recursos únicamente en tiempo o en frecuencia, lo que limita el servicio a un solo usuario para cada ranura de tiempo. Esta capacidad de LTE resulta en la experiencia de estar siempre conectado y permite la proliferación de aplicaciones y sistemas inalámbricos integrados.

Dado que el hardware para FDD y TDD de LTE es el mismo, excepto por la unidad de radio, los operadores del TDD serán por primera vez capaces de disfrutar de economías de escala contando con un amplio soporte de productos FDD.

La 3GPP ha definido para uso de LTE 15 bandas de frecuencia distintas para FDD y 8 bandas para TDD.

Desde los comienzos se ha pensado en que LTE soporte múltiples bandas de frecuencia, lo que quiere decir que tiene la capacidad de alcanzar rápidamente altas economías de escala y cobertura global.

LTE está definida para soportar anchos de banda de portadora flexibles desde 1.4 MHz a 20 MHz en varias bandas del espectro y el despliegue tanto de FDD como TDD. Esto quiere decir que un operador puede introducir LTE en bandas nuevas o en bandas ya existentes haciendo que su despliegue implique todas las bandas celulares. A diferencia de anteriores sistemas celulares, LTE abarca rápidamente múltiples bandas.

### 2.2.5. Arquitectura de un sistema LTE

La arquitectura de una red es la forma en la que se interconectan varios elementos que tienen las tecnologías adecuadas para definir los servicios y protocolos que satisfacen los requerimientos de red.

Para implementar una red LTE se debe considerar que debe soportar una transmisión de datos efectiva, una alta calidad de servicio y que debe soportar mayor movilidad que las anteriores tecnologías.

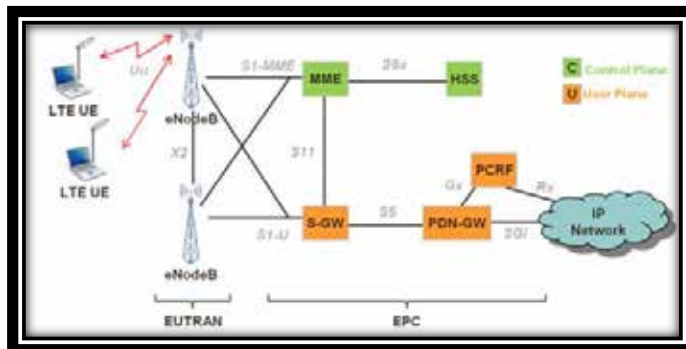
Para alcanzar los objetivos de LTE es preciso implementar una arquitectura de red plana. Estas estructuras tienen tendencia a simplificar lo máximo posible la jerarquía, especialmente reduciendo la cantidad de elementos que se ocupan en la red. Por ejemplo, el componente radio en LTE debe asumir funciones que en otros sistemas se hallan distribuidas en diferentes plataformas.

La arquitectura de una red del sistema LTE es conocida como EPS (Evolved Packet System, Sistema de Paquetes Evolucionado). Básicamente este sistema está compuesto, como se muestra en la **Figura 12** y **Figura 13**, por los Equipos de Usuario (UE), la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC (Evolved Packet Core, Núcleo de Paquetes Evolucionado). Estos últimos representan la capa de conexión IP cuyo objetivo principal es garantizar una alta conectividad.

La red troncal de los anteriores sistemas 3GPP estaba dividida en forma lógica por: Dominio de Circuitos (CS), Dominio de Paquetes (PS) y Subsistema Multimedia IP (IMS).

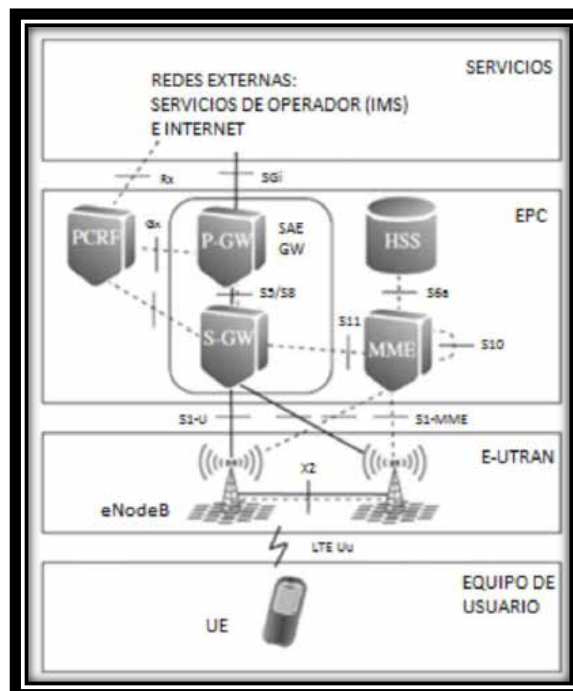
El Dominio de Circuitos es el encargado de proveer los servicios de telecomunicaciones mediante la conmutación de circuitos, utilizadas en las redes de acceso anteriores llamadas UTRAN. Para el caso de las redes evolucionadas E-UTRAN de LTE no se contempla el uso del Dominio de Circuitos debido a que todos sus servicios están orientados únicamente al Dominio de Paquetes. El Subsistema Multimedia IP (IMS) es un conjunto de especificaciones utilizado como capa de conectividad hacia los servicios de telefonía y multimedia a través de IP.

Las diferentes interfaces tienen sus propias características y cada una ellas cumplen una función importante en el correcto funcionamiento de la red, sin embargo, es necesario separar el EPC (Red Troncal) y E-UTRAN (Red de Acceso Inalámbrico) para analizarlos por separado.



**Figura 12.** Elementos de red LTE.

Fuente: LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles.



**Figura 13.** Arquitectura de red LTE.

Fuente: LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access.

### **2.2.5.1. EPC**

Es la red troncal, cuyo diseño ha sido concebido principalmente para proporcionar un servicio de conectividad IP (evolución del servicio GPRS) mediante una arquitectura de red optimizada que permite explotar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN.

### **2.2.5.2. E-UTRAN**

Se observa que la arquitectura de E-UTRAN (Red de Acceso Inalámbrico) es sencilla, la estación base se conectan a la red troncal por medio de las interfaces S1, X2.

Las estaciones base (E-UTRAN) brindan un acceso directo desde equipo de usuario hacía la red troncal y viceversa. La red de acceso inalámbrico (E-UTRAN) consta de dos capas que son: RNL (Radio Network Layer, Capa de Red de Radio) y TNL (Transport Network Layer, Capa de Red de Transporte).

LTE tiene varias interfaces para interconectar sus elementos, las interfaces que permiten la interacción entre el EPC (Red Troncal) y E-UTRAN (Red de Acceso Inalámbrico) son:

#### **Ø Uu**

Interfaz entre el UE (Equipo de Usuario) y el eNB (Estación Base EUTRAN), representa la interfaz aire. Para downlink (enlace de bajada) se utiliza modulación OFDMA y para uplink (enlace de subida): SC-FDMA.

#### **Ø S1-U**

Interfaz entre el eNB (Estación Base E-UTRAN) y el S-GW (Almacena información de movilidad local) se utiliza para enviar datos de las aplicaciones utilizadas, además usa UDP (Protocolo no orientado a la conexión) para transporte y como aplicación el protocolo GTP-U (Porta datos de usuario en paquetes IPv4, IPv6).

#### **Ø S1-MME**

Interfaz entre el eNB (Estación Base E-UTRAN) y el MME (Gestión de movilidad) utilizada para señalización en el envío de paquetes entre el eNB (Estación Base E-UTRAN) y MME (Gestión de movilidad), además usa SCTP (protocolo de

comunicación de capa de transporte) como transporte y S1-AP como protocolo de aplicación.

Ø **S11**

Interfaz entre el MME (Gestión de movilidad) y S-GW (Almacena información de movilidad local) para la gestión de bearers, por ejemplo, para unirse a la red o para procesar las solicitudes de los diferentes servicios prestados.

Ø **X2**

Entre eNodeB, basada en el mismo protocolo que S1-U y generalmente se usa para handover (traspaso, también llamado handoff o transferencia).

Ø **S6a**

Entre el MME (Gestión de movilidad) y HSS (Almacena y administra todo lo relativo a datos de suscripción de los usuarios) utilizado para el proceso de autenticación, autorización y contabilidad.

Ø **S5**

Se usa para el envío de datos entre el S-GW (Almacena información de movilidad local) y PDN-GW (Gateway accede al Internet o a otras redes de datos externas), además para transporte se usa UDP (Protocolo no orientado a la conexión) y como aplicación GTP-U (Porta datos de usuario en paquetes IPv4, IPv6).

Ø **SGi**

Interfaz entre PDN-GW (Gateway accede al Internet o a otras redes de datos externas) y el PDN (Redes lógicas para conexión), basada en la interface Gi de 2G/3G.

Ø **eNodeB**

Es el elemento evolucionado del elemento *Node B* en UTRA de UMTS. Es el hardware que está conectado a la red de telefonía móvil que se comunica directamente de forma inalámbrica con teléfonos móviles (UE), como una estación base de transceptor (BTS) en redes GSM.

Tradicionalmente, un Nodo B tiene una funcionalidad mínima y está controlado por un Controlador de red de radio (RNC). Sin embargo, con un eNodeB,



## 2.2.6. Bandas LTE

El 3GPP tiene claramente definido que LTE es un sistema que puede funcionar en diversas bandas de frecuencias en el fin de satisfacer la necesidad de diferentes operadores en el mundo. En la **Figura 15** muestra el rango de frecuencias para cada tipo de tecnología:

Cabe destacar que alrededor de la banda de 2,3 GHz (Banda 40), existe una superposición significativa de espectro de frecuencias (100 MHz) entre LTE TDD y WiMAX. Para muchos operadores de WiMAX que usan actualmente esta banda de frecuencias, es una oportunidad ideal para evolucionar su red a tecnologías LTE.

Actualmente una de las bandas más populares es la banda 6 (2.6Ghz) de la cual ha sido subastado recientemente espectro.

Band	UL (MHz)	DL (MHz)	Simp. BW (MHz)	Total BW (MHz)	Modo	Notes
1	1920 - 1980	2110 - 2170	60	120	FDD	EMEA, Japan
2	1850 - 1910	1930 - 1990	60	120	FDD	Quad band GSM
3	1710 - 1785	1805 - 1880	75	150	FDD	Quad band GSM, DCS 1800
4	1710 - 1755	2110 - 2155	45	90	FDD	AWS
5	824 - 849	869 - 894	25	50	FDD	Quad band GSM
6	830 - 840	875 - 885	10	20	FDD	Not applicable to 3GPP
7	2500 - 2570	2620 - 2690	70	140	FDD	EMEA
8	880 - 915	925 - 960	35	70	FDD	Quad band GSM, GSM 900
9	1749.9 - 1784.9	1844.9 - 1879.9	35	70	FDD	1700 MHz, Japan
10	1710 - 1770	2110 - 2170	60	120	FDD	Extended AWS
11	1427.9 - 1452.9	1475.9 - 1500.9	25	50	FDD	1.5 GHz Lower, Japan
12	698 - 716	728 - 746	18	36	FDD	Lower 700 MHz, C-Spire+USCC-LTE
	N/A	716 - 722	6	6	DL	Originally Ch. 55 for QCOM mDTV venture - only MediaFLO. Spectrum was sold to AT&T
13	777 - 787	746 - 756	10	20	FDD	Upper 700 MHz, VzW-LTE
14	788 - 798	758 - 768	10	20	FDD	US FCC Public Safety
15	1900 - 1920	2600 - 2620	20	40	FDD	
16	2010 - 2025	2585 - 2600	15	30	FDD	
17	704 - 716	734 - 746	12	24	FDD	AT&T-LTE
18	815 - 830	860 - 875	15	30	FDD	Japan 800 MHz Lower
19	830 - 845	875 - 890	15	30	FDD	Japan 800 MHz Upper
20	832 - 862	791 - 821	30	60	FDD	800 MHz EMEA
21	1447.9 - 1462.9	1495.9 - 1510.9	15	30	FDD	1.5 GHz Upper, Japan
22	3410 - 3490	3510 - 3590	80	160	FDD	3.5G
24	1626.5 - 1660.5	1525 - 1559	34	68	FDD	
25	1950 - 1915	1930 - 1995	65	130	FDD	AWS-G, Sprint LTE within this band
	1915 - 1920	1995 - 2000	5	10	FDD	AWS-H, will be auctioned by Feb. 2015.
26	814 - 849	859 - 894	35	70	FDD	Sprint / Nextel iDen
27	807 - 824	852 - 869	17	34	FDD	Lower 850 MHz
28	703 - 748	758 - 803	45	90	FDD	700 MHz APAC
	2000 - 2020	2180 - 2200	20	40	FDD	Dish Network to deploy LTE-A by 2016.
33	1900 - 1920		20		TDD	
34	2010 - 2025		15		TDD	China Mobile (CM) TD-SCDMA
35	1850 - 1910		60		TDD	
36	1930 - 1990		60		TDD	
37	1910 - 1930		20		TDD	
38	2570 - 2620		50		TDD	European - TD-LTE
39	1880 - 1920		40		TDD	CM TD-SCDMA
40	2300 - 2400		100		TDD	CM TD-LTE
41	2496 - 2690		194		TDD	TDD 2.5 GHz
42	3400 - 3600		200		TDD	TDD 3.5 GHz
43	3600 - 3800		200		TDD	TDD 3.6 GHz
44	703 - 803		100		TDD	700 MHz APAC

**Figura 15.** Bandas de frecuencia y regiones correspondientes.

Fuente: [www.ludditus.com](http://www.ludditus.com)

### 2.2.7 Modelos de propagación

Son formulaciones matemáticas experimentales diseñadas para la caracterización de la propagación de ondas de radio en función de la distancia, la frecuencia y otras condiciones. Generalmente, se desarrolla un modelo único para anticipar el comportamiento de propagación para todos los enlaces idénticos bajo restricciones idénticas. Se crea con el objetivo de formalizar la manera en que las ondas de radio se propagan de un lugar a otro, por lo general, estos modelos predicen la pérdida de ruta a lo largo de un enlace o el área de cobertura efectiva de un transmisor.

Se establece una clasificación de estos modelos matemáticos diferenciándolos según tres aspectos fundamentales de los mismos.

En la actualidad hay multitud de modelos, y como en tantos otros casos no hay una única manera de clasificarlos, por lo que la clasificación atenderá a dos características distintas:

- **Ambiente de propagación:** Dependiente del entorno en el que se vayan a realizar los cálculos. Esta manera de clasificar los modelos será la que se centre en escoger el modelo que más convenga según el ambiente de propagación. Existen dos grandes grupos, la propagación en exteriores y la propagación en interiores.
- **Origen de los datos:** Esta última clasificación atenderá a la manera de obtener los datos de cada modelo. Por lo tanto, se pueden diferenciar los sistemas como deterministas, empíricos o una combinación de ambos (semi-empíricos). Esta manera de clasificarlos es la más común en multitud de artículos puesto que no depende del ambiente ni de sus condiciones, sino simplemente de las características de cada modelo. Aun así, según el lugar en el que se realizaran los cálculos puede establecerse una relación directa con cada tipo de esta clasificación.

### **2.2.7.1. Según el ambiente de propagación**

#### **∅ Modelos de propagación interiores**

Propagación radioeléctrica en interiores se refiere a la que tiene lugar dentro de los edificios, como por ejemplo centros comerciales, oficinas, viviendas particulares, etc. En estos escenarios habrá que tener en cuenta una serie de efectos que condicionan la propagación, como puede ser la existencia de obstáculos (paredes, techos, muebles) la difracción producida en las esquinas, el efecto guía de ondas que tiene lugar en los pasillos debido a las múltiples reflexiones dentro de ellos, etc.

En este tipo de entorno, para frecuencias de trabajo por debajo de los 600MHz, los modelos empíricos suelen ser lo bastante precisos para poder realizar los cálculos de propagación con ellos. Sin embargo, para frecuencias por encima de los 600MHz (típicamente comunicaciones móviles) los modelos empíricos no sirven, por lo que se emplean los deterministas, ya que tienen en cuenta la propagación multitrayecto con reflexiones y difracciones.

La aplicación de los modelos de propagación en interiores es múltiple:

- Planificación de redes celulares.
- Planificación de redes WLAN en edificios de múltiples plantas.
- Análisis de recepción de emisiones terrestres o por satélite.
- Análisis de cobertura y planificación de red en túneles o estaciones de metro.

La propagación en interiores no solo se limita a los edificios, sino que puede referirse a la transmisión radioeléctrica dentro de cualquier tipo de estructura, como túneles, estadios, carros, etc. Algunos de estos modelos son:

- Modelo ITU para atenuación interior.
- Modelo de pérdida de trayectoria.

#### **∅ Modelos de propagación exteriores**

A diferencia de la propagación en interiores donde pese a haber visto distintos ambientes que en un principio pueden parecer muy diferentes, como por ejemplo un túnel y un edificio de vivienda, a efectos de la propagación de las ondas que tienen

lugar en su interior son muy semejantes, ya que se rigen por los mismos efectos descritos anteriormente como pueden ser la reflexión y difracción en lugares confinados delimitados estructuralmente.

Sin embargo, dentro de la categoría de escenarios exteriores se engloba una mayor cantidad de ambientes en los que la propagación varía considerablemente entre ellos. Se dividen las situaciones de este tipo de propagación en:

- Escenarios por satélite.
- Escenarios rurales.
- Escenarios urbanos.

Algunos de estos modelos son:

- Modelo Okumura.
- Modelo Okumura-Hata para zonas urbanas.
- Modelo Okumura-Hata para áreas suburbanas.
- Modelo Okumura-Hata para espacios abiertos.
- Modelo COST-Hata.

#### **2.2.7.2. Según el origen de los datos**

##### **∅ Modelos de propagación deterministas**

Se basan en principios fundamentales de la física en cuanto a propagación de ondas de radio y los fenómenos que la rodean. Pueden ser aplicados en diferentes entornos sin afectarles a su precisión. En la práctica su implementación requiere enormes bases de datos de características relativas al entorno, las cuales son imposibles o inviables de obtener de manera práctica.

Los algoritmos usados por los modelos deterministas son generalmente muy complejos y computacionalmente poco eficientes. Por esta razón su implementación se restringe a pequeñas áreas. Por el contrario, si su implementación es correcta, proporcionan gran precisión en su predicción comparados con los modelos empíricos.

Algunos de estos modelos son:

- Modelo de Friis.

- Modelo de dos rayos.
- Modelo de Ikegami.

#### ∅ **Modelos de propagación semi-empíricos**

Se toman en cuenta medidas realizadas, pero éstas luego se ajustan a cierto modelo establecido teóricamente.

- Los modelos se infieren tomando en cuenta características del terreno, altura de antenas, etc.
- Se consideran distintos escenarios, pero se realiza la predicción entorno a uno de éstos, luego, en los otros escenarios se consideran factores de ajuste (factor de ajuste de altura, altura de obstáculos y densidad de los mismos).
- Más útil que los empíricos, en los casos en donde la realización de medidas es difícil o no es suficiente.

Algunos de estos modelos son:

- Longley-Rice, ITS o ITR.
- Okumura-Hata.
- COST 231 – Hata.
- COST 231 - Walfish - Ikegami.

#### ∅ **Modelos de propagación empíricos ó estadísticos**

Se basan en los resultados experimentales promedios obtenidos de procesos de medición del nivel de intensidad de campo para varias condiciones de operación. Suministran resultados probabilísticos más confiables que los modelos teóricos.

- Son aquellos basados en medidas reales realizadas sobre un entorno en particular ya sea de ambiente o clima.
- Se deben tomar varias medidas para obtener resultados acordes a la realidad.
- Útiles como primera estimación en una planificación.

Algunos de estos modelos son:

- ITU-R
- FCC

- Lee
- Young

### 2.2.8 Modelo Okumura-Hata

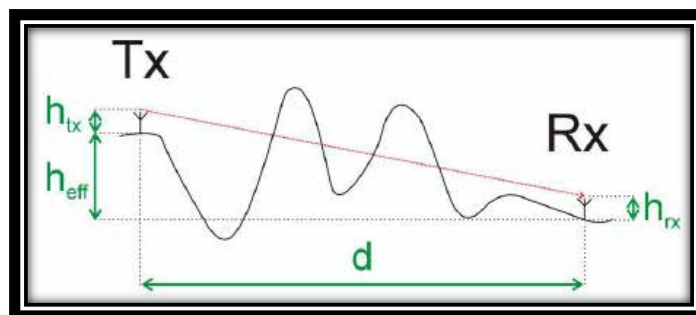
También conocido como “Modelo Hata” este modelo de computación creado por Masaharu Hata fue una mejora del propuesto por Yoshihisa Okumura anteriormente, y que simplificaba los cálculos imponiendo la restricción de no poder emplearse para predicción de áreas con distancias superiores a los 20km.

La ventaja de este modelo es que únicamente necesita cuatro parámetros para realizar los cálculos, lo que supone un tiempo de computación bastante corto. Sin embargo, no tiene en cuenta el perfil del terreno que hay entre el transmisor y el receptor, debido a que se propuso para los casos en los que el transmisor se encuentra sobre una posición elevada. Tampoco se considera la reflexión y el Shadowing (Desvanecimiento por sombra).

Los cuatro parámetros empleados son:

- Frecuencia: desde los 150 MHz hasta los 1500 MHz.
- Distancia entre el transmisor y el receptor: desde 1 km hasta 20 km.
- Altura efectiva de la antena del transmisor ó estación base: 30 m a 200 m.
- Altura de la antena del receptor ó móvil: 1 m a 10 m.

Como se puede ver en la **Figura 16**, la altura de las antenas se mide desde el suelo donde se colocan, también aparece un parámetro de altura efectiva que relaciona ambas alturas y otorga una mayor precisión al modelo.



**Figura 16.** Perfil de terreno con los parámetros de Okumura-Hata.

Fuente: Prediction of Wavepropagation.

La ecuación que modela la pérdida básica para una **ciudad pequeña o mediana** es:

$$Lu[dB] = 69.55 + 26.16 \log\left(\frac{f}{1MHz}\right) - 13.82 \log\left(\frac{hbe}{h0}\right) - a(Hr) + [44.9 - 6.55 \log\left(\frac{hbe}{h0}\right)] \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (3)$$

La ecuación para el factor de corrección en una **ciudad pequeña o mediana** es:

$$a(Hr) = [1.1 \log(f) - 0.7]$$

$$f \quad 400 \text{ MHz} \quad a(Hr) = 3.2 [\log(11.75 Hr)]^2 - 4.97 \quad (8)$$

El factor de difracción = 1, y el Nivel de señal recibida en dbm:

$$RSL_p(dBm) = P_t + G_t - L_U \quad (9)$$

Cuando el área donde se aplica el modelo no es urbana se realiza una corrección del cálculo de la pérdida básica:

#### Área suburbana

$$A_a [dB] = 5.4 + 2 \log\left(\frac{f}{28}\right)^2 \quad (10)$$

#### Área abierta

$$A_a [dB] = 4.78 \log(f)^2 - 18.33 \log(f) + 40.94 \quad (11)$$

### 2.2.9. Geometría de las redes celulares

Si en cada célula se utiliza antenas omnidireccionales, la zona de cobertura será casi circular, pero estas no recubren el plano o producen solapes (reducción del rendimiento espectral, porque para la cobertura de un mismo punto se emplean dos frecuencias), es así que se estudia coberturas del tipo poligonal, que recubran el plano sin solapes. Hay tres polígonos regulares que cumplen esta condición: el triángulo, el cuadrado y el hexágono.

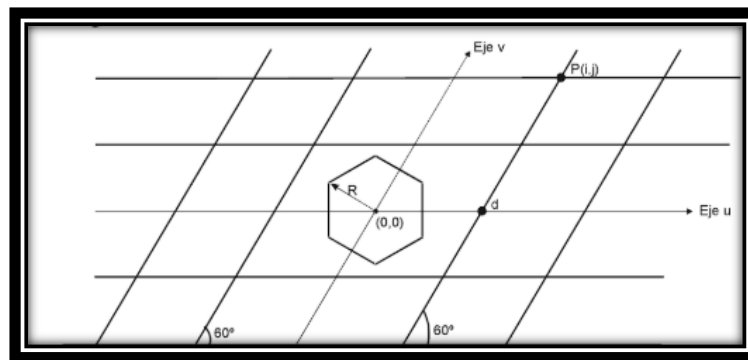
Suponiendo que se coloca la estación base en el baricentro del polígono y que el radio de cobertura es R la distancia del baricentro a un vértice, las superficies de los polígonos son:

- Triángulo  $S = \frac{3 \sqrt{3} R^2}{4}$
- Cuadrado  $S = 2R^2$
- Hexágono  $S = \frac{3 \sqrt{3} R^2}{2}$

Para el diseño se ha tomado la forma hexagonal porque es más robusta, proporciona la mayor superficie de célula por lo que, utilizando hexágonos, será mínimo el número de células necesario para la cobertura de un área determinada.

La geometría celular proporciona ubicaciones de las estaciones base y datos necesarios para cálculos de interferencia, tamaño de agrupación y distancia de reutilización, para esto se toma un eje de coordenadas oblicuo formando un ángulo de 60° entre sí.

Las estaciones se sitúan en puntos llamados nodos, la estructura resultante se denomina retícula de planificación como se observa en la **Figura 17**. La distancia entre dos nodos consecutivos se llama paso de la retícula representada con la letra **d**.



**Figura 17.** Retícula de planificación.

Fuente: Comunicaciones móviles.

- **d**: Pasa de la retícula.
- **R**: Radio celular.
- **D**: Distancia de reutilización ó distancia entre centro de células.

El radio R del hexágono, se asocia al radio de cobertura de la célula, se le llama radio celular.

La relación entre el paso de la retícula y el radio celular es:

$$d = R \sqrt{3} \quad (12)$$

Y la superficie de la célula será:

$$S_c = \frac{3 \sqrt{3} R^2}{2} = \frac{\sqrt{3} (R \sqrt{3})^2}{2} = \frac{\sqrt{3} d^2}{2} \quad (13)$$

También hay que tener en cuenta el área del rombo cocanal y esta viene dada por:

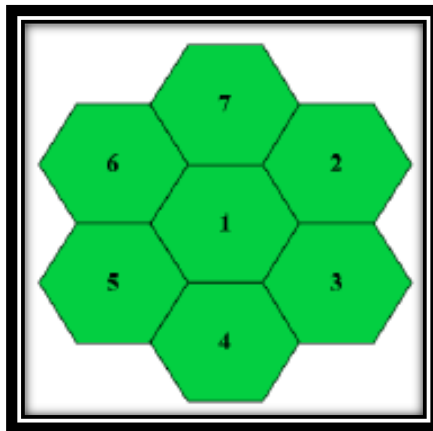
$$S_c = \frac{\sqrt{3} D^2}{2} = N \frac{\sqrt{3} d^2}{2}; D^2 = N d^2 \quad (14)$$

Luego el rombo co-canal equivale a  $N$  rombos elementales de lado  $d$  asociados a otras tantas estaciones de base distintas. Por lo tanto, el conjunto de células encerradas por el rombo co-canal constituye una agrupación de  $N$  células. El rombo co-canal genera por traslación la distribución repetitiva y sistemática de estaciones base en el área.

La unión de varias células se conoce como Clúster y los más utilizados son  $N=4$ ,  $N=7$ ,  $N=12$ , esta configuración es utilizada para la reutilización de frecuencias, en la **Figura 18**, se muestra un Clúster de 7 células.

La sectorización de una célula omnidireccional es la primera fase que se cumple, posteriormente para aumentar la capacidad se divide cada fase celular por mitades y tiene las siguientes consecuencias:

- Se reduce a la mitad el radio de la célula.
- Se multiplica por cuatro aproximadamente el número de células necesarias para la cobertura de la zona dividida.
- Aumenta la capacidad de tráfico en un factor de cuatro.



**Figura 18.** Clúster de 7 células.  
Fuente: Sistemas de comunicaciones móviles.

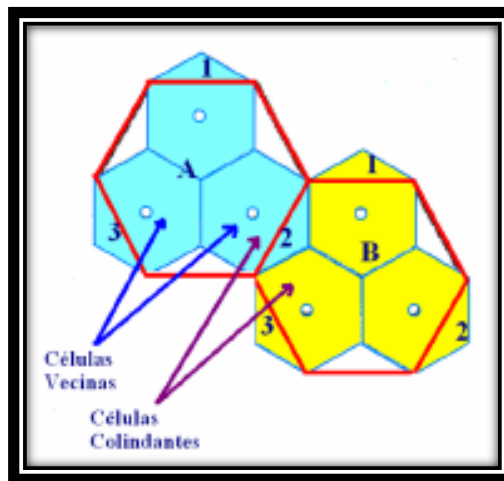
- Se requiere de una mayor precisión en la ubicación de las estaciones base.
- Se reduce la potencia de transmisión.

- Tiene un aumento de costo al ser necesario más ubicaciones y estaciones bases.

### 2.2.9.1. Limitación de frecuencia

La asignación de frecuencia para las estaciones base es un punto de gran importancia a analizar, ya que es vital proporcionar a cada célula un juego de frecuencias adecuando al volumen de tráfico, considerando márgenes de crecimiento del servicio.

Para la distribución de las frecuencias se debe tener en cuenta la interferencia de canales adyacentes, estas imponen ciertas limitaciones a las asignaciones de frecuencias en células contiguas, para lo cual se debe siempre tener muy claro lo que son las células vecinas y las células colindantes. En la **Figura 19** se observa que las células vecinas constituyen sectores de una misma estación base y las colindantes son estaciones base diferentes pero que tienen una frontera común.



**Figura 19.** Células vecinas y colindantes.  
Fuente: Sistemas de Telefonía Móvil Celular.

Para garantizar valores adecuados para la protección contra interferencia de canales adyacentes se debe cumplir lo siguiente:

- Mayor o igual que tres canales dentro de una misma célula.
- Mayor que dos canales en células vecinas.

- Mayor que un canal en células colindantes.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta son las interferencias que puede darse si operan otros sistemas de comunicación. Tomando en cuenta las condiciones mencionadas para la asignación de la frecuencia para ingresar en nuestro diseño, se debe distinguir que bandas de frecuencias utilizan las operadoras de telefonía móvil.

El máximo ancho de banda que puede ser usado por las operadoras es de 10 MHz, tomando en cuenta que en LTE el ancho de banda es variable, en este caso se utiliza 20MHz, habría realizar un estudio técnico para saber si el país está en la capacidad de asignar este ancho de banda para el uso eficiente y la explotación de tecnología LTE en todo su dimensionamiento.

La frecuencia de portadora tanto del enlace de bajada como enlace de subida se encuentran en el rango de 0 a 65535 el cuál es designado por medio del EARFCN (E- UTRAN Absolute Radio Frequency Channel Number), lo que permite asignar un determinado número para cada canal en una banda determinada, además se tiene 100MHz los cuales son asignados en todos los canales para el Channel Raster.

### 2.2.9.2. Cálculo del radio de la celda

Los cálculos de cobertura se realizan únicamente para uplink (enlace de subida) debido a una recomendación de 3GPP, ya que amplificar la señal que emite el equipo móvil en la estación base es una tarea más fácil de realizar que hacerlo en el UE (equipo de usuario), además para mejorar la señal únicamente se implementa MIMO (Múltiple Entrada - Múltiple Salida), para la cual lo conveniente es implementarlas en la estación base más no en el UE (equipo de usuario).

La ecuación (15) permite calcular la cobertura de una celda mediante la siguiente expresión:

$$L = 40(1 - 0,004 \cdot h) \log(R) - 18 \log(h) + 21 \log(f) + 80 \quad (15)$$

Donde:

L: Pérdida en el espacio.

h: Altura de la antena (m).

R: Radio de cobertura (Km).

f: Frecuencia de la portadora (MHz).

Para  $h_t$  hay que tomar en cuenta la altura de la antena más la altura promedio de las edificaciones, entonces se tendría una altura promedio de 40 metros y la frecuencia de la portadora que se tiene es 733 MHz (Uplink), 788 MHz (Downlink).

$$\begin{aligned}L &= 40 (1 - 0,004 - 40) \log (R) - 18 \log (40) + 21 \log (733) + 80 \\L &= 40 (0,84) \log (R) - 28,837 + 60,1672 + 80 \\L &= 33,6 \log (R) + 111,3301 \\ \frac{L - 111,3301}{33,6} &= \log (R)\end{aligned}$$

Se obtiene que el radio de cobertura está ligado netamente con la pérdida en el espacio.

### 2.2.9.3. Distribución de frecuencias

LTE está diseñado para tener factor 1 en reutilización de frecuencias lo que permite maximizar la eficiencia del espectro, todas las células vecinas utilizan los mismos canales de frecuencia y por lo tanto no existe una célula de planificación para hacer frente a los problemas de interferencias.

Al utilizar todas las células los mismos canales de frecuencia existe una alta probabilidad de que un bloque de recursos programado a los teléfonos de usuario de borde, también está siendo transmitido por la célula vecina y hay una gran interferencia.

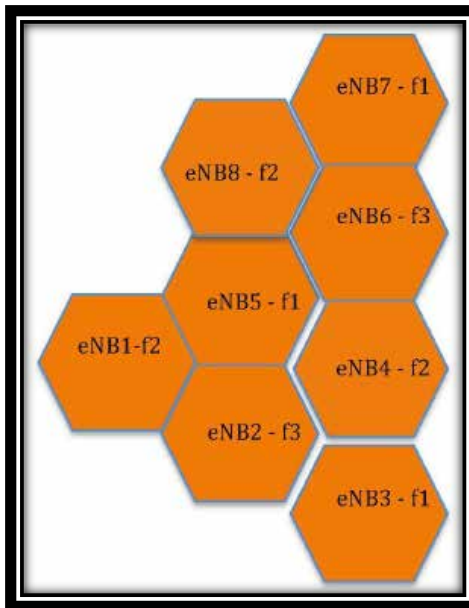
Dado que las células LTE están en el área urbana es necesario buscar una alternativa para asignación de frecuencias de las mismas, ya que el utilizar una sola frecuencia en todas las celdas implica tener gran interferencia. Esta técnica de una sola frecuencia trabajaría excelente en entornos rurales donde los usuarios se encuentran dispersos.

Para mitigar el problema de interferencia entre celdas se trabaja con SFR (Soft Frequency Reuse, Reutilización de Frecuencia Suave). El concepto SFR se basa en

dividir todo el ancho de banda portadora LTE en 3 subsecciones, en este caso cada una de 5MHz.

Al dividir el ancho de banda total para 3 se tiene como resultado 25 Radio bases con 300 subportadoras para cada enodeB.

En la **Figura 20** se observa la distribución de frecuencias en las diferentes celdas del diseño LTE.



**Figura 20.** Distribución de frecuencias.  
Fuente: Sistemas de Telefonía Móvil Celular.

### 2.2.10 Definición de términos básicos

**3GPP** (3rd Generation Partnership Project, Proyecto Asociación de Tercera Generación): Organización de desarrollo de estándares.

**AMPS** (Advanced Mobile Phone System, Sistema de Telefonía Móvil Avanzado): Sistema telefónico móvil avanzado de telefonía móvil de primera generación que evita interferencias entre llamadas.

**Banda ancha:** Capacidad para transmitir datos un canal compartido.

**CDMA 2000:** Es una marca registrada de la Telecommunications Industry Association (TIA-USA) en los Estados Unidos, no del término genérico CDMA.

(Similarmente Qualcomm bautizó y registró el estándar 2G basado en CDMA, IS-95, como cdmaOne).

**BTS:** Estación Base Transceptora.

**Celda:** Área geográfica manejada por un elemento de red (BTS en una red GSM).

**Clúster:** Cantidad total de canales que la banda de frecuencias requiere y se distribuye entre varias celdas (ó células).

**Célula:** Área geográfica a la que proporciona cobertura una estación base.

**División de Frecuencia Ortogonal):** Multiplexación por división de frecuencias ortogonales, consiste en enviar un conjunto de ondas portadoras de diferentes frecuencias, donde cada una transporta información, la cual es modulada en QAM o en PSK.

**Full-Duplex:** Modo de transmisión que permite transmitir en ambas direcciones simultáneamente por el mismo canal.

**GPRS (General Packet Radio Service, Servicio General de Paquetes Vía Radio):** Sistema que permite mandar y recibir paquetes de datos usando la red de telefonía por satélite.

**Half-Duplex:** Modo de transmisión que permite transmitir en ambas direcciones, pero no simultáneamente, por el mismo canal.

**Handover:** Sistema utilizado en comunicaciones móviles celulares con el objetivo de transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente en una de las estaciones. Este mecanismo garantiza la realización del servicio cuando un móvil se traslada a lo largo de su zona de cobertura.

**HSPA (High Speed Packet Access, Acceso a Paquetes de Alta Velocidad):** Combinación de tecnologías posteriores y complementarias a la 3ª generación de telefonía móvil.

**IMS (IP Multimedia Subsystem, Subsistema Multimedia IP):** Conjunto de especificaciones que describen la arquitectura de las redes de siguiente generación.

**Interferencia intersimbólica (ISI):** Es una forma de distorsión de una señal en la cual un símbolo interfiere con símbolos posteriores.

**IP (Internet Protocol, Protocolo Internet):** Es parte de la capa de Internet del conjunto de protocolos TCP/IP. Es uno de los protocolos de Internet más importantes, ya que permite el desarrollo y transporte de datagramas de IP (paquetes de datos).

**ITU (International Telecommunication Union, Unión Internacional de Telecomunicaciones):** Organismo especializado de las naciones unidas para las tecnologías de la información y la comunicación TIC.

**LTE (Long Term Evolution, Evolución a Largo Plazo):** Es un estándar para comunicaciones inalámbricas de transmisión de datos de alta velocidad para teléfonos móviles y terminales de datos.

**MIMO (Múltiple Entrada - Múltiple Salida):** Se refiere específicamente a la forma como son manejadas las ondas de transmisión y recepción en antenas para dispositivos inalámbricos.

**OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Multiplexación por Offset):** El offset de una señal es un voltaje de directa (DC) que se le suma a una señal AC para obtener un desplazamiento en la amplitud de dicha señal, ya sea positivo o negativo.

**Radio base:** Instalación fija o moderada de radio para la comunicación media, baja o alta bidireccional.

**Radio teléfono:** Es un sistema que ha precedido a la tecnología de telefonía móvil.

**Red de acceso:** Hace mención a aquella parte de la red de comunicaciones que conecta a los usuarios finales con algún proveedor de servicios y es complementaria al núcleo de red.

**RNC (Radio Network Controller, Controlador de Red de Radio):** El protocolo de control de recursos de radio (RRC) pertenece a la pila de protocolos y maneja el plano de control de señalización de la Capa 3 entre los UEs (equipos de usuario) y la UTRAN.

**SMS (Short Message Service, Servicio de Mensajes Cortos):** Sistema de mensajes de texto para teléfonos móviles.

**UMTS (Universal Mobile Telecommunications System, Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles):** Estándar que se emplea en la llamada tercera generación de telefonía móvil, que permite disponer de banda ancha en telefonía móvil y transmitir un volumen de datos importante por la red.

**Walkie-Talkie:** Es un transceptor de radio portátil.

**WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas):** Es una norma de transmisión de datos que utiliza las ondas de radio en las frecuencias de 2,5 a 5,8 GHz y puede tener una cobertura hasta de 70 km.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

Para Arias, F. (2012, pág. 110): “La metodología del proyecto incluye el tipo o tipos de investigación, las técnicas y los instrumentos que fueron utilizados para llevar a cabo la indagación. Es el “cómo” se realizó el estudio para responder al problema planteado. Es así, como se da a conocer entonces en el presente capítulo, el abordaje metodológico llevado a cabo para cubrir el problema planteado de como efectuar el estudio del modelo Okumura-Hata en la propagación radio móvil de redes 4G. En este orden de ideas, el capítulo comprende todo lo referente al tipo, nivel y diseño de la investigación, así como técnicas e instrumentos de recolección de datos.

#### **3.1 Tipo de Investigación**

La investigación descriptiva, para Arias, F. (2012, pág. 24), “consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere”. Siendo el objetivo de la presente investigación, simular el modelo Okumura-Hata en la propagación radio móvil de redes 4G, se buscó describir los parámetros de desempeño y rendimiento mediante simulación de software para entender el comportamiento de la misma, por tal razón, la presente investigación se adaptó a lo descrito anteriormente por los autores y se desarrolló bajo el tipo Descriptivo.

#### **3.2 Diseño de la Investigación**

El estudio se sustentó en una investigación documental, ya que se estudió un problema con el propósito de ampliarlo con apoyo, principalmente de trabajos previos, es decir, en la evolución histórica del objeto en estudio. Arias, F. (2012, pág. 27), plantea la investigación documental de la siguiente forma:

Documental: "La investigación documental es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos".

### **3.3 Nivel de la Investigación**

Según Arias, F. (2012, pág. 23), el nivel de investigación puede definirse como "el grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto de estudio". "El tipo de investigación según el nivel o grado de profundidad con el que se realizará el estudio" (pág. 110).

Este trabajo se ha considerado de tipo descriptivo el cual es definido por Sabino, C. (1992, pág. 54) como "Las investigaciones descriptivas utilizan criterios sistemáticos que permiten poner de manifiesto la estructura o el comportamiento de los fenómenos en estudio, proporcionando de ese modo información sistemática y comparable con la de otras fuentes". "También deben clasificarse como investigaciones descriptivas los diagnósticos que realizan consultores y planificadores: ellos parten de una descripción organizada y lo más completa posible de una cierta situación, lo que luego les permite en otra fase distinta del trabajo trazar proyecciones u ofrecer recomendaciones específicas". Este nivel de investigación consiste, fundamentalmente, en caracterizar un fenómeno o situación concreta indicando sus aspectos más importantes, es decir, en si el objetivo de este nivel de investigación es el de conocer las situaciones frente a un tema en particular, no quedándose solo en la recolección de datos sino también en ayudar a predecir e identificar la relación que existe entre dos o más variables.

### **3.4 Técnica e Instrumentos de Investigación**

Según Arias, F. (2012, pág. 67), "Se entenderá por técnica de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información".

Las técnicas de recolección de datos utilizadas en la presente investigación fueron la observación secundaria y documental, ya que se observaron los resultados arrojados por la simulación del modelo Okumura-Hata en la propagación radio móvil de redes 4G.

Cabe destacar que el uso de este instrumento responde a lo planteado por Arias, F. (2012, pág. 68), quien define que: “Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información”.

### **3.5 Fases Metodológicas**

#### **Fase I: Estudio del modelo Okumura-Hata y sus variantes.**

En esta fase del proyecto de grado, se realizó una investigación sobre las distintas variantes que presenta el modelo de predicción para la propagación Okumura-Hata para los distintos entornos; bien sean estos rurales, urbanos, semi-urbanos, etc., que puedan presentarse al momento de establecer un enlace de comunicaciones.

#### **Fase II: Construcción de la formulación del modelo Okumura-Hata para las bandas de frecuencia 4G utilizadas en Venezuela.**

En la siguiente fase, se manipuló toda la información obtenida para de esta manera adaptar dicho modelo para su posterior uso en Venezuela a partir de las distintas bandas y parámetros establecidos por las empresas de telefonía.

De igual manera, se tomaron como puntos de referencia algunas radio-bases ubicadas en el municipio San Diego, como guía para dar inicio al estudio de propagación radio móvil.

#### **Fase III: Simulación de la formulación construida.**

En la fase a continuación, mediante los parámetros de desempeño dentro de la red 4G, se procedió a simular y comprobar la cobertura de la red móvil mediante una aplicación móvil.

#### **Fase IV: Determinación de la propagación de la señal 4G con los resultados obtenidos de la simulación.**

En la presente fase, se verificó que los cálculos de pérdida por trayectoria del modelo en estudio arrojados por la formulación creada en la fase II concordaron lo más cerca posible a los resultados arrojados por la simulación en la fase III.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

Las siguientes fases describen el desarrollo de los objetivos específicos establecidos al inicio de este proyecto de grado.

#### **4.1 Fase I: Estudio del modelo Okumura-Hata y sus variantes.**

En esta fase del proyecto, luego de una extensa investigación sobre las distintas variantes que presenta el modelo de predicción para la propagación Okumura-Hata en sus distintos entornos; bien sean estos urbanos, suburbanos y abiertos, se seleccionaron los aspectos más importantes de cada modelo, sin perder de vista al seleccionado para el presente estudio.

El modelo de propagación Okumura está basado en estadísticas, y se construyó con datos recopilados en la ciudad de Tokio, Japón. Es un modelo predictivo e ideal para ser usado en ciudades con diversas estructuras urbanas, pero no con muchas estructuras altas que generen bloqueo. El principal de estos fue el de áreas urbanas y luego se usó como base para los demás.

La fuente básica de este modelo se tomó de la pérdida de la trayectoria del espacio libre en un área urbana con una altura de estación base ( $h_b$ ) de 0.2Km y una altura de antena móvil ( $h_r$ ) de 0.003Km. La atenuación media se expresa en función de la frecuencia (0.1-3 Ghz) y la distancia desde la estación base (1-100Km) al receptor. Okumura también observó y dio factores de modificación para la transmisión de la antena de la estación base  $G(h_b)$ . Se obtuvieron algunos otros factores de modificación en forma gráfica en áreas suburbanas y rurales con un área urbana. La suma o la resta de estos factores dependen del entorno y de las distintas situaciones. La naturaleza totalmente empírica del modelo de Okumura muestra que los parámetros como la frecuencia, el tipo de entorno de la antena, el tamaño de la ciudad y la orientación de la calle están restringidos a los rangos exactos

determinados por los datos calculados en los que se basa el modelo. Esto prueba que la predicción puede llevar a resultados poco prácticos si uno o más parámetros se usan fuera del rango. Algunas otras restricciones también existen con el parámetro de relación del terreno.

La frecuencia de trabajo solo debe estar comprendida entre 150-1920 MHz, la altura de la antena de la estación móvil debe estar entre 1 a 3 m, la altura de la antena de la estación base entre 30 y 100 m, y la distancia de enlace entre 1 a 100 km.

La ecuación que representa al modelo es la siguiente:

$$L = L_{FSL} + A_{MU} \quad H_{MG} \quad H_{BG} \quad \sum K_{correccion} \quad (16)$$

Donde:

$L$  = Pérdida de la trayectoria, en dB.

$L_{FSL}$  = Pérdida de espacio libre, en dB.

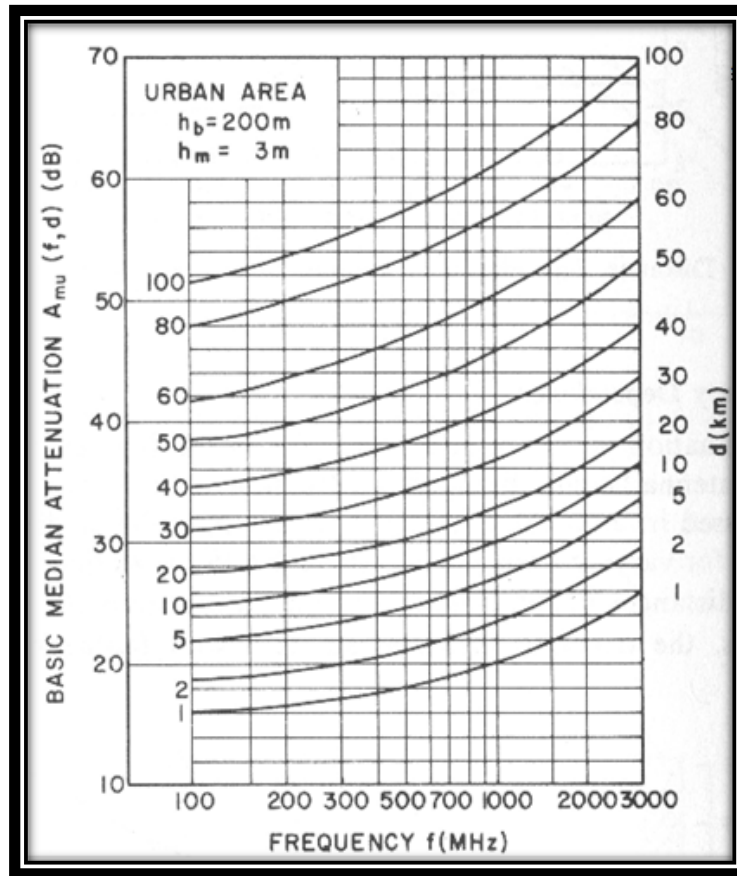
$A_{MU}$  = Atenuación media, en dB.

$H_{MG}$  = Factor de ganancia de altura de la antena de la estación móvil.

$H_{BG}$  = Factor de ganancia de altura de la antena de la estación base.

$K_{correccion}$  = ganancia del factor de corrección (como el tipo de entorno, superficies de agua, obstáculos aislados, etc.)

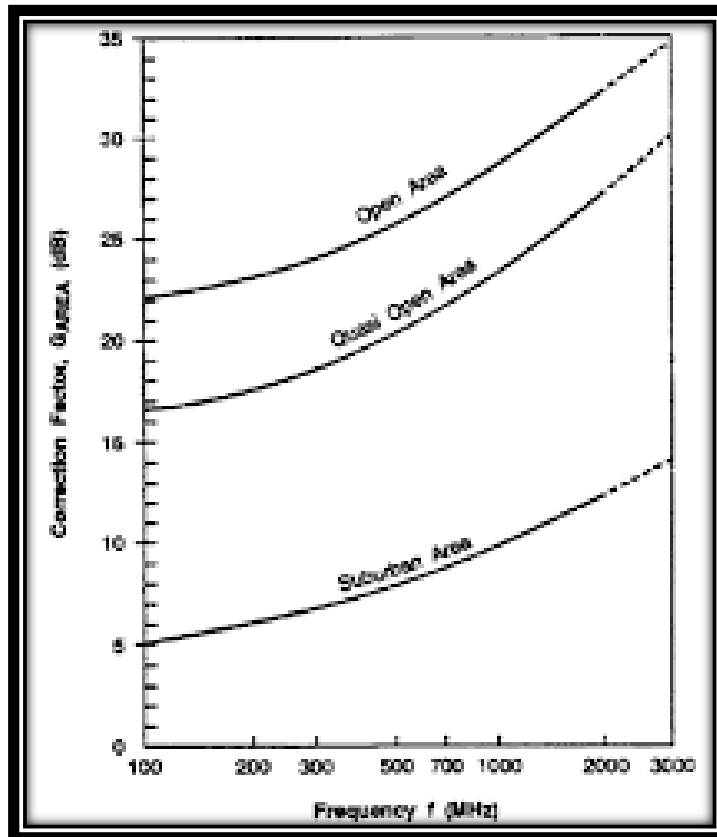
Este es uno de los modelos más utilizados para la predicción de la propagación de la señal ya que Okumura desarrolló un conjunto de curvas que proporcionan la atenuación media en relación con el espacio libre ( $A_{MU}$ ). Dichas curvas (ver **Figura 21**) se desarrollaron a partir de exhaustivas mediciones usando antenas verticales y omni-direccionales tanto en la antena base como en la antena móvil de acuerdo al rango de frecuencias antes mencionado.



**Figura 21.** Curva de atenuación relativa media para espacio libre en un área urbana.  
Fuente: Wikipedia.

Por ejemplo, a una frecuencia de 850MHz y la distancia del transmisor-receptor de 5 km, la atenuación es cercana a 26dB. Este valor se lee desde la escala de la izquierda ó derecha (véase **Figura 21**) en el punto donde la línea vertical constante a 850 MHz se intersecta con la curva de distancia paramétrica de 5 km. La proyección de esta intersección en la escala de atenuación mediana básica da una atenuación de aproximadamente 26dB.

De igual forma, el modelo fué desarrollado tanto para áreas suburbanas como para áreas abiertas (véase **Figura 22**), aplicándose de igual manera ciertas curvas las cuales aplican un factor de corrección, representando una pérdida adicional debido a la propagación en un entorno diferente al urbano.



**Figura 22.** Factor de corrección para área sub-urbanas, áreas abiertas y cuasi abiertas.  
Fuente: Wikipedia.

Una variante dada por Masaharu Hata en 1980 y basado en los resultados de las mediciones realizadas por Yoshihisa Okumura en la ciudad de Tokio, consistía en un conjunto de ecuaciones que permitían estimar las pérdidas de propagación en diferentes tipos de zonas (urbana, semiurbana y abierta o rural). Es uno de los modelos más utilizados en la planificación y dimensionamiento del segmento de propagación de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones.

De acuerdo a los modelos de propagación han puesto su mayor interés en predecir la potencia por medio de una señal recibida a una distancia determinada del transmisor, así como también las variaciones de la potencia de la señal en la cercanía de un punto de interés.

De acuerdo a lo establecido en el modelo Okumura este modelo es aplicable para frecuencia en el rango de 150MHz a los 1920MHz, es decir, se comprende la banda VHF y UHF (sin embargo, este puede ser extrapolado para frecuencias de 3000MHz ya ubicándonos en la banda SHF) y a su vez distancias de 1km a 100km entre transmisor y receptor, y altura de la antena de la estación base en el rango de 30-1000m.

La ecuación que describe el comportamiento del modelo Hata (también conocido como modelo Okumura-Hata) ya ha sido explicado con más detalle en el apartado **2.2.8**. La diferencia entre la predicción dada por la ecuación de Hata y la curva de Okumura revela pequeñas diferencias que con poca frecuencia exceden de 1 dB.

Por otra parte, En el año 1994, la Cooperativa Europea para la Investigación Científica Técnica (EURO-COST) proyectó el modelo COST 231 para superar las restricciones en el modelo Hata, como el rango de frecuencia (restringido de 150-1500MHz). Para lograr este objetivo, bajo COST231 una gran cantidad de mediciones de propagación fueron realizadas en la banda de 900 MHz y en la banda de 1800 MHz en una variedad de entornos diferentes que iban desde picocélulas a macrocélulas, y desde microcélulas a macrocélulas. Sobre la base de esta amplia campaña de medición en ciudades europeas, COST 231 investigó diferentes modelos existentes y creó dos modelos de propagación, es decir, **COST 231-Hata** y **COST 231 Walfish Ikegami**. Estos modelos son adecuados para terrenos planos y se basan en los enfoques de los modelos Walfish-Bertoni, Ikegami y Hata.

Para el caso del modelo COST 231-Hata, se formuló la ecuación a continuación:

$$Lu(dB) = 46,3 + 33,9 \log(f(MHz)) - 13,82 \log(Hb(m)) \\ + [44,9 - 6,55 \log(Hb(m))] \log(d(km)) - a(Hr) + C$$

De la ecuación (4) se tiene para el factor de corrección:

Ü **Rural o suburbano**

$$a(Hr) = (1,1 \log(f(MHz)) - 0,7) Hr(m) - (1,56 \log(f(MHz)) - 0,8)$$

## Ü Urbano

$$a(Hr) = \begin{cases} 8,29 \log^2(1,54 Hr(m)) & 1,1 & 150 & f & 200 \\ 3,2 \log^2(11,75 Hr(m)) & 4,97 & 200 & f & 1500 \end{cases}$$

$$C = \begin{cases} 0 \text{ dB, } \text{áreas suburbanas, ciudades medias y pequeñas} \\ 3 \text{ dB, } \text{áreas metropolitanas y urbanas} \end{cases}$$

### 4.2 Fase II: Construcción de la formulación del modelo Okumura-Hata para las bandas de frecuencia 4G utilizadas en Venezuela.

En la siguiente fase se procedió a tomar la información proporcionada por el modelo para de esta manera adaptarla a su uso en Venezuela, específicamente a una radiobase ubicada en el Municipio San Diego del estado Carabobo; tomando en cuenta las distintas bandas y parámetros establecidos por las empresas de telefonía, de igual manera las especificaciones de las antenas empleadas en el enlace.

Primero, se basó el estudio de acuerdo a las bandas de frecuencia 4G utilizadas en Venezuela, las cuales son:

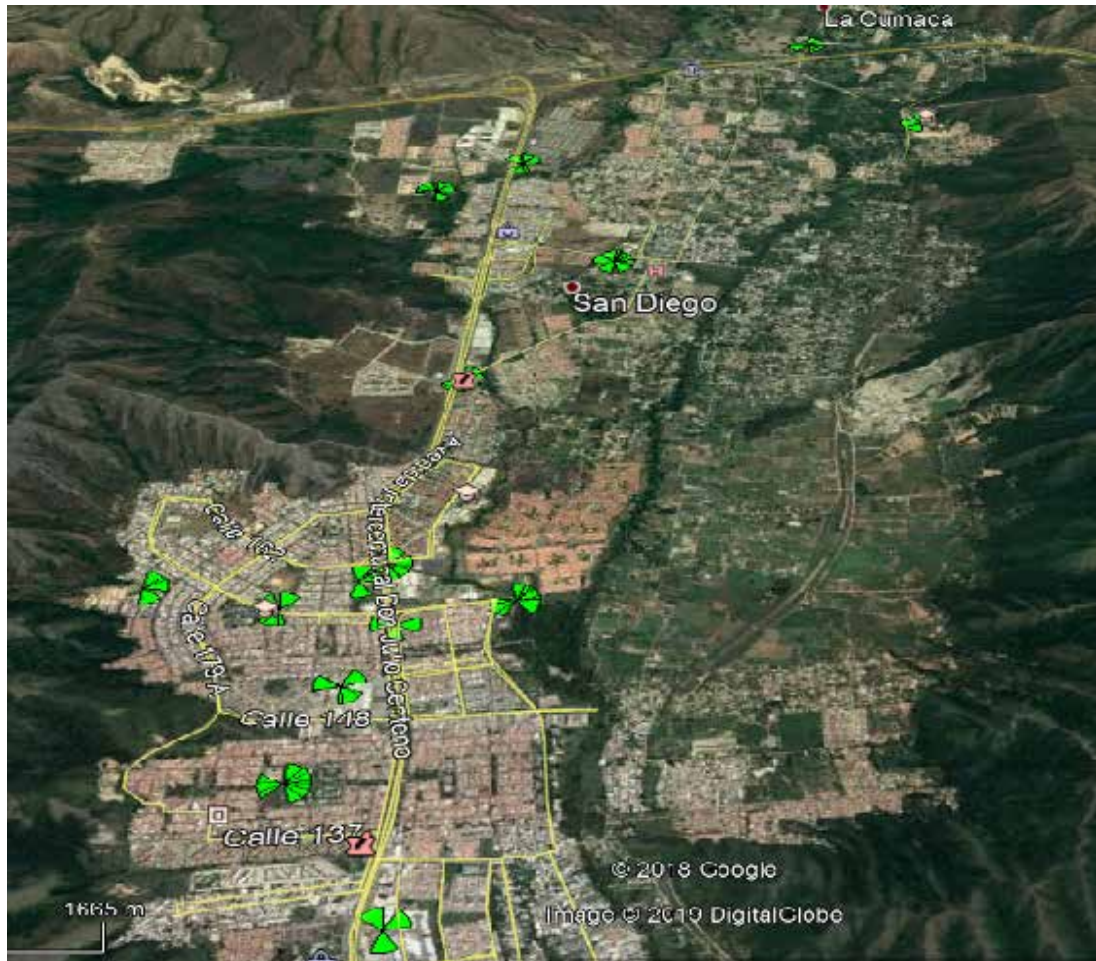
- **Digitel 4G:** Banda 3 LTE (1700MHz/1800MHz).
- **Movistar 4G+:** Banda 4 LTE (1700/2100MHz).
- **Movilnet:** Aunque no tiene 4G, operará en la misma banda que Movistar.

Para el estudio llevado a cabo, se utilizaron las operadoras Digitel y Movistar, así como la frecuencia portadora en el enlace de bajada ó descarga (downlink) de cada banda (1800MHz para Digitel y 2100MHz para Movistar).

En el caso de las antenas, se asumió el uso de los modelos Andrew DBXLH-6565B-VTM y Huawei APE4516R1v06, con una potencia de transmisión típica de  $20W = 43,1\text{dBm}$ .

- **Andrew DBXLH-6565B-VTM**
  - Ganancia (dBi) @1800MHz= 17,8.
  - Ganancia (dBi) @2100MHz= 18,3.
- **Huawei APE4516R1v06**
  - Ganancia (dBi) @1800MHz= 15,8.
  - Ganancia (dBi) @2100MHz= 16,2.

El estudio se realizó a varias distancias de las radiobase cercana a la urbanización La Caracara y Las Mercedes, y la radiobase ubicada en la Esmeralda (véase **Figura 23**), con una altura de antena de 30m y una altura del dispositivo receptor (UE) de 2m.



**Figura 23.** Ubicación de las radiobases empleadas por Movistar en San Diego.  
Fuente: DigitalGlobe.

Se aprecia en la **Figura 23** que Movistar cuenta con 15 BTS, cubriendo el municipio San Diego.

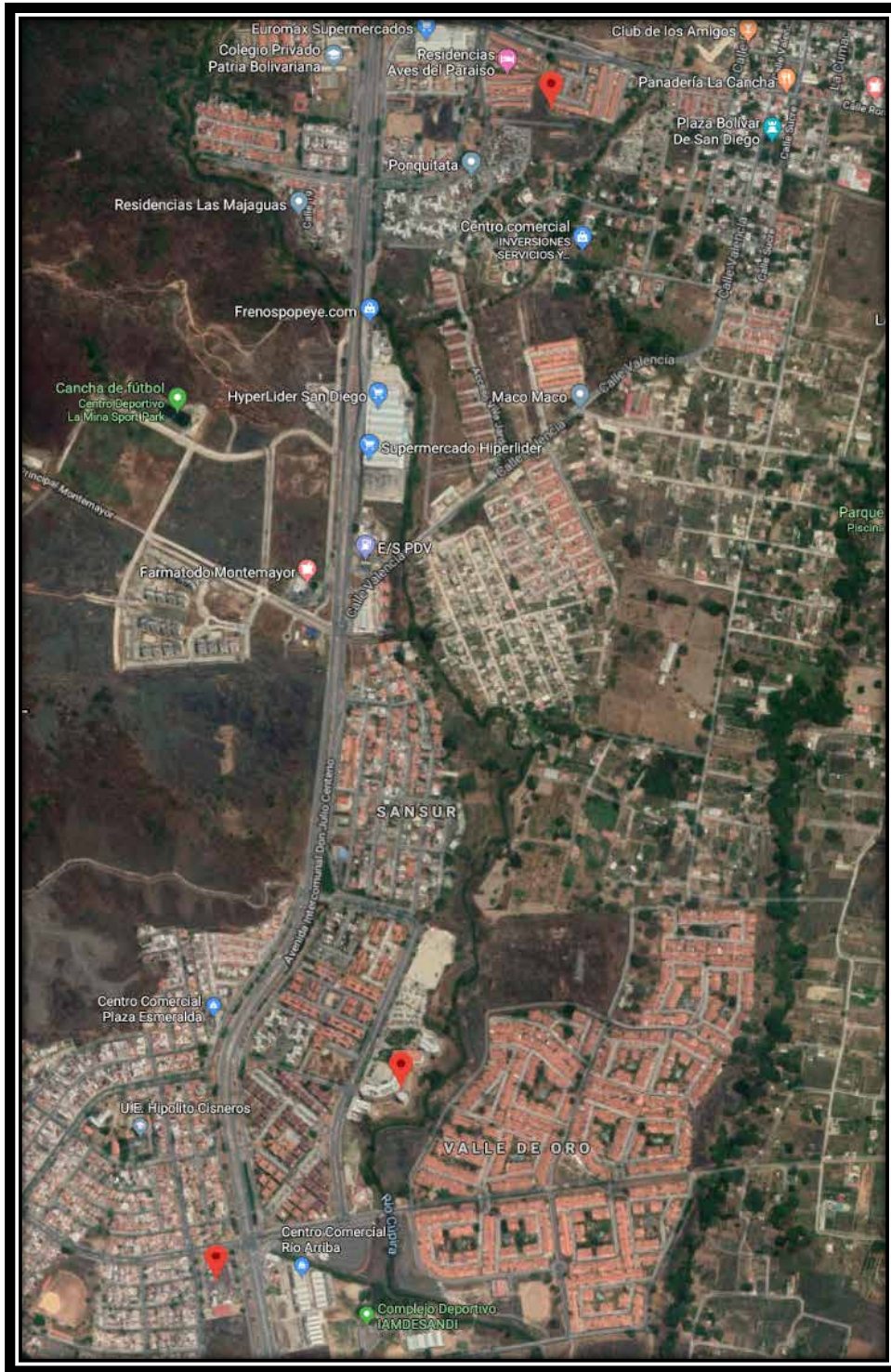
De igual manera se obtuvo la misma información por parte de Digitel, la cual dispone de 8 BTS en el municipio (véase **Tabla 1**).

Nombre de Sector	Nombre BTS	Sector	Latitud	Longitud
BIGLOW21	BIGLOW1	1	10.19253611111111	-67.96263611111111
BIGLOW22	BIGLOW1	2	10.19253611111111	-67.96263611111111
BIGLOW23	BIGLOW1	3	10.19253611111111	-67.96263611111111
CUMACACAR21	CUMACACAR1	1	10.28250833333333	-67.94487500000000
CUMACACAR22	CUMACACAR1	2	10.28250833333333	-67.94487500000000
CUMACACAR23	CUMACACAR1	3	10.28250833333333	-67.94487500000000
ESMERALDA21	ESMERALDA1	1	10.23083055555556	-67.96657777777778
ESMERALDA22	ESMERALDA1	2	10.23083055555556	-67.96657777777778
ESMERALDA23	ESMERALDA1	3	10.23083055555556	-67.96657777777778
ESMERALDA24	ESMERALDA1	4	10.23083055555556	-67.96657777777778
METROPLAZA21	METROPLAZA1	1	10.21011111111111	-67.96401388888889
METROPLAZA22	METROPLAZA1	2	10.21011111111111	-67.96401388888889
METROPLAZA23	METROPLAZA1	3	10.21011111111111	-67.96401388888889
SANDIEGO21	SANDIEGO1	1	10.25667500000000	-67.95903333333333
SANDIEGO22	SANDIEGO1	2	10.25667500000000	-67.95903333333333
SANDIEGO23	SANDIEGO1	3	10.25667500000000	-67.95903333333333
TULIPANES21	TULIPANES1	1	10.26649444444444	-67.95953888888889
TULIPANES22	TULIPANES1	2	10.26649444444444	-67.95953888888889
TULIPANES23	TULIPANES1	3	10.26649444444444	-67.95953888888889
UJAPSANDIEGO21	UJAPSANDIEGO1	1	10.23510555555556	-67.96240277777778
UJAPSANDIEGO22	UJAPSANDIEGO1	2	10.23510555555556	-67.96240277777778
UJAPSANDIEGO23	UJAPSANDIEGO1	3	10.23510555555556	-67.96240277777778
URBMORRO21	URBMORRO1	1	10.21783333333333	-67.95740555555556
URBMORRO22	URBMORRO1	2	10.21783333333333	-67.95740555555556
URBMORRO23	URBMORRO1	3	10.21783333333333	-67.95740555555556
URBMORRO24	URBMORRO1	4	10.21783333333333	-67.95740555555556

**Tabla 1.** Ubicación de las radiobases empleadas por Digitel en San Diego.

Fuente: Digitel.

En la **Figura 24** se aprecian tres de las BTS más cercanas a la Universidad José Antonio Páez. La **Figura 25** es la ubicación de la Caracas el cual varios de los cálculos son desde esta BTS.



**Figura 24.** Ubicación de las radiobases de Digitel más cercanas a la UJAP.  
**Fuente:** Google Maps.



**Figura 25.** Ubicación 3D de la radiobase SANDIEGO1.  
Fuente: Google Maps.

Para el caso de la banda empleada por **Digitel**, de la ecuación (3) se tiene para la pérdida de trayectoria:

$$Lu(dB) = 69,55 + 26,16 \log\left(\frac{f}{1MHz}\right) - 13,82 \log\left(\frac{be}{o}\right) - a(Hr) + \left[44,9 - 6,55 \log\left(\frac{be}{o}\right)\right] \log\left(\frac{R}{Ro}\right)$$

De la ecuación (4) se tiene para el factor de corrección:

$$a(Hr) = (1,1 \log(f) - 0,7)Hr + (1,56 \log(f) - 0,8)$$

$$a(Hr) = [1,1 \log(1820) - 0,7](2) + [1,56 \log(1820) - 0,8]$$

$$a(Hr) = 1,49dB$$

$$Lu(dB) = 69,55 + 26,16 \log(1820) - 13,82 \log(30) + [44,9 - 6,55 \log(30)] \log(1,57) - 1,49$$

$$Lu(dB) = 139,83dB$$

Luego, para el balance de potencia, de acuerdo a la ecuación (5).

$$Prx(dBm) = Ptx(dBm) + Gt(dBi) - Lu(dB)$$

$$Prx(dBm) = 43 + 18,3 \quad 139,83$$

$$Prx(dBm) = 78,53dBm$$

Siendo el factor de difracción = 1

Por otra parte, para el caso de la banda empleada por **Movistar**, de la ecuación (3) se tiene para la pérdida de trayectoria:

$$Lu(dB) = 69,55 + 26,16 \log\left(\frac{f}{1MHz}\right) - 13,82 \log\left(\frac{be}{o}\right) - a(Hr) + \left[44,9 - 6,55 \log\left(\frac{be}{o}\right)\right] \log\left(\frac{R}{Ro}\right)$$

De la ecuación (4) se tiene para el factor de corrección:

$$a(Hr) = (1,1 \log(f) - 0,7)Hr - (1,56 \log(f) - 0,8)$$

$$a(Hr) = [1,1 \log(2135) - 0,7](2) - [1,56 \log(2135) - 0,8]$$

$$a(Hr) = 1,53dB$$

$$Lu(dB) = 69,55 + 26,16 \log(2135) - 13,82 \log(30) + [44,9 - 6,55 \log(30)] \log(1,53) - 1,53$$

$$Lu(dB) = 141,21dB$$

Luego, para el balance de potencia, de acuerdo a la ecuación (5).

$$Prx(dBm) = Ptx(dBm) + Gt(dBi) - Lu(dB)$$

$$Prx(dBm) = 43 + 18,3 - 141,21$$

$$Prx(dBm) = 79,9dBm$$

Siendo el factor de difracción = 1

Recordando que:

$Lu$  = pérdidas de trayectoria

$(Hr)$  = factor de corrección de altura de antena

$f$  = frecuencia

$R$  = distancia

$Hb$  = altura BS (radio base)

$Hr$  = altura MS (antena móvil)

### 4.3 Fase III: Simulación de la formulación construida.

Para la siguiente fase se realizó una selección de diversas aplicaciones descargables de manera gratuita en la Play Store de Android. De cada aplicación fueron analizados diversos parámetros propios de las redes 4G, entre ellas el RSRP, el RSRQ y el RSSNR. De igual manera, existen otros parámetros importantes para la identificación de la radiobase en estudio, como de la operadora empleada.

Dichas aplicaciones despliegan una información detallada de cada parámetro perteneciente al tipo de red.

**MCC:** 734 (Venezuela). Mobile Country Code, identifica el país.

**MNC:** 04 (Movistar) y 02 (Digitel). Mobile Network Code, identifica la operadora móvil.

**TAC:** Tracking Area Code, identifica la zona de ubicación. Una zona de ubicación es un conjunto de estaciones base (BTS o repetidoras) agrupadas para optimizar la señalización. Es lo mismo que LAC en UMTS.

**CID:** CellID, número generalmente único usado para identificar cada estación base transceptora (BTS o repetidora) dentro de un LAC.

**RSRP:** Reference Signal Received Power, es el promedio lineal de la potencia de la señal de referencia (en vatios) según el ancho de banda especificado. Este es el elemento más importante que tiene que medir el UE para la selección de celda, reelección y el handover. Se puede pensar en esto como el RSCP.

Dado que esto mide solo la potencia de referencia, podemos decir que esta es la fuerza de la señal deseada.

Los niveles generalmente oscilan entre cerca de -75dBm y -120dBm en el borde de la celda LTE.

**RSRQ:** Reference Signal Received Quality, proporciona información adicional cuando RSRP no es suficiente para tomar una decisión confiable de handover o de reelección de celda. Indica la calidad de la señal de referencia recibida. (-3dB... -19,5dB)

$$RSRQ = \frac{N \times RSRP}{RSSI}$$

N = número de bloques de recursos físicos utilizados.

RSSI = medición pura de potencia de banda ancha, incluida la potencia intracelular, interferencia y ruido.

**PCI:** Physical Cell Identifier, el identificador físico de celda se utiliza para diferenciar las señales de radio de diferentes celdas. El rango de PCI disponible es de 0 a 503, de los cuales cada celda tendrá su propio PCI con el fin de que el UE no se confunda al momento de conectarse a una celda.

En caso de que se tenga una cantidad de celdas que excedan el número de PCI, este tendrá que reutilizar cada 15km, la clave es que las celdas que comparten un PCI no pueden estar geográficamente cerca o de lo contrario presentarían interferencia entre sí.

El PCI es una combinación de dos señales de sincronización: señales de sincronización primarias PCI-ID (PSS) y las señales de sincronización secundarias PCI-Grupo (SSS).

**EARFCN:** EUTRA Absolute Radio Frequency Channel Number, número absoluto de canal de radio frecuencia E-UTRA. Identifica de forma única la banda LTE y la frecuencia de la portadora. Por ejemplo: Banda 1 y Banda 4 pueden tener la misma frecuencia de Rx 2110 – 2170MHz, pero su EARFCN es diferente. EARFCN es independiente del BW del canal. Su rango es 0-65535.

Las aplicaciones empleadas en el estudio de la red fueron **Cell Tower Locator**, **G-NetTrack** y **Network Cell Info**, con las cuales se puede consultar la posición aproximada de las torres celulares GSM / WCDMA / LTE en un mapa. A las torres almacenadas en la base de datos se les puede consultar el ID de celda, intensidad de señal y ubicación de GPS.

Los primeros cálculos se realizaron desde la operadora Digitel, con la ubicación en la Universidad José Antonio Páez, se observan en las siguientes

imágenes y luego se van observando los mismos valores desde los diferentes programas a utilizar.



**Figura 26.** Medición con Digitel en Cell Tower Locator.  
Fuente: Cell Tower Locator.

Las diversas mediciones realizadas con el programa **Cell Tower Locator** se muestra en la **Tabla 2**, tomando como referencia la BTS SANDIEGO1 ubicada en el centro de San Diego.

Cell Tower Locator							
<b>MCC</b>	734	734	734	734	734	734	734
<b>MNC</b>	02	02	02	02	02	02	02
<b>TAC</b>	16250	16250	16250	16250	16250	16250	16250
<b>eNB</b>	22662	22662	22662	22662	22662	22662	22662
<b>PCI</b>	126	126	126	126	126	126	126
<b>CID</b>	1	1	1	1	1	1	1
<b>RSRP</b>	-74dBm	-70dBm	-68dBm	-78dBm	-73dBm	-75dBm	-80dBm
<b>RSRQ</b>	-8 dB	-8 dB	-10 dB	-10 dB	-7 dB	-7 dB	-7 dB
<b>RSSNR</b>	16.8 dB	20.8dB	24.2 dB	16.2 dB	12.6 dB	13.6 dB	21 dB
<b>EARFCN</b>	1350MHz	1350MHz	1350MHz	1350MHz	1350MHz	1350MHz	1350MHz
<b>f</b>	1820MHz	1820MHz	1820MHz	1820MHz	1820MHz	1820MHz	1820MHz

**Tabla 2.** Mediciones obtenidas de la BTS SANDIEGO1 con Cell Tower Locator.  
Fuente: Luque y Tatasciore (2019).

Con el siguiente programa G-NetTrack Lite se tiene:

Operator: DIGITEL									
MCC:734	MNC:02	TAC:16250	Type:LTE						
eNB:22662	CID:1	PCI:126	F:1350	B:L3	TA:0				
RSRP:-74	RSRQ:-7	SNR:23.4	CQI:-	RSSI:-63					
Longitude:-67.96188					Latitude:10.235765				
Speed:0km/h				GPS Accuracy:9m					
Height:441m			Altitude:441m			Ground:0m			
UL: 0 kbps					DL: 0 kbps				
Data:			DIGITEL-LTE				IDLE		
Serving time: 347s									
TIME	EVENT	AC	CELLID	CI	ARFCN	LEVEL	QUAL	TYPE	SERV
16:48:17		16250	22662-1	126	1350	-70	-9	4G	

**Figura 27.** Medición con Digitel en G-NetTrack.

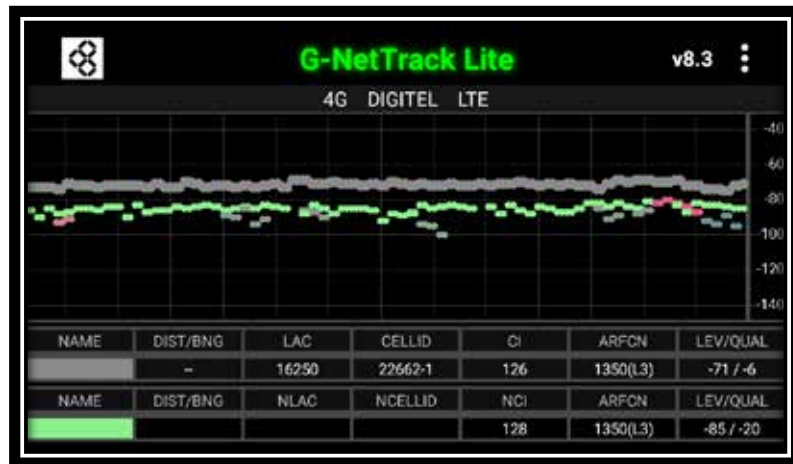
Fuente: G-Net Track.

Se procedió de la misma manera como el cálculo anterior reflejado en la **Tabla 3** para las mediciones obtenidas.

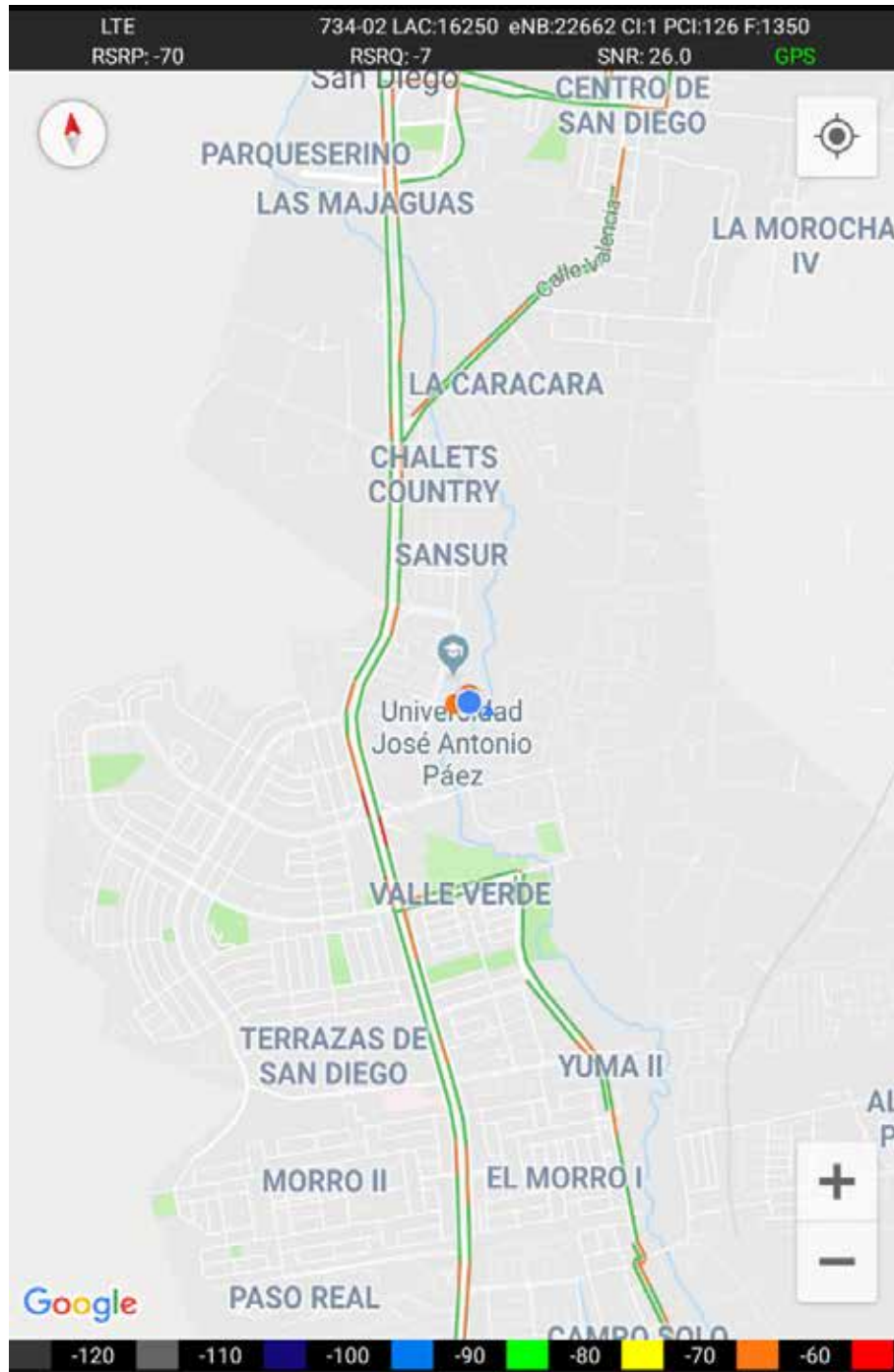
G-NetTrack							
MCC	734	734	734	734	734	734	734
MNC	02	02	02	02	02	02	02
TAC	16250	16250	16250	16250	16250	16250	16250
eNB	22662	22662	22662	22662	22662	22662	22662
PCI	126	126	126	126	126	126	126
CID	1	1	1	1	1	1	1
RSRP	-73dBm	-73dBm	-72dBm	-71dBm	-72dBm	-73dBm	-72dBm
RSRQ	-6 dB	-10 dB	-10 dB	-8 dB	-7 dB	-6 dB	-6 dB
RSSNR	10.6 dB	9.2dB	17.6 dB	12.2 dB	13.4 dB	13.4 dB	12.6 dB
RSSI	-63 dBm	-63 dBm	-63 dBm	-63 dBm	-63 dBm	-63 dBm	-63 dBm
EARFCN	1350MHz	1350MHz	1350MHz	1350MHz	1350MHz	1350MHz	1350MHz
f	1820MHz	1820MHz	1820MHz	1820MHz	1820MHz	1820MHz	1820MHz

**Tabla 3** Mediciones obtenidas de la BTS UJAPSANDIEGO1 con G-NetTrack.  
Fuente: Luque y Tatasciore (2019).

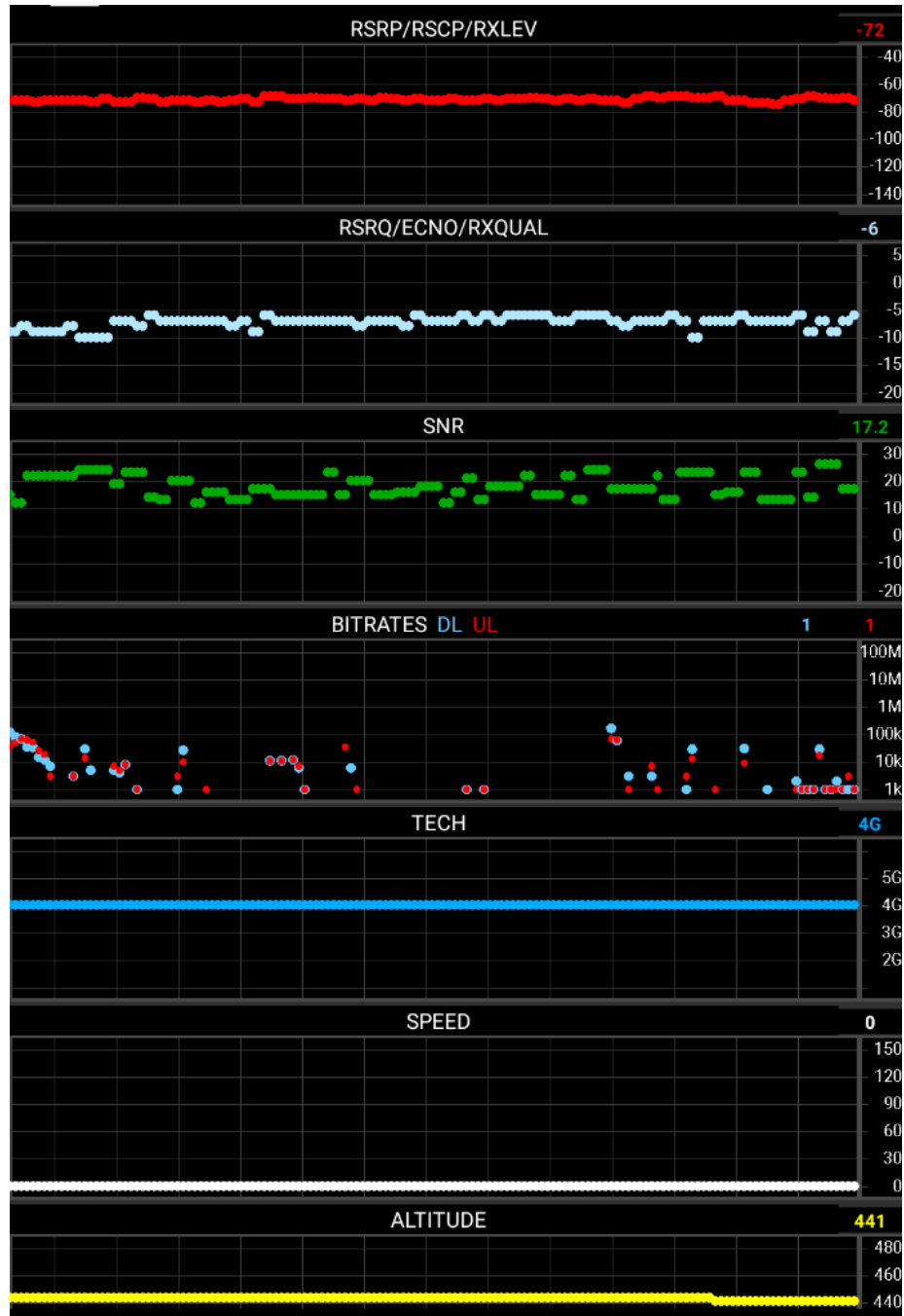
Otros de los parámetros que arrojó el programa fueron:



**Figura 28.** Medición con Digitel en G-NetTrack.  
Fuente: G-Net Track.



**Figura 29.** Medición con Digitel en G-NetTrack.  
 Fuente: G-Net Track.



**Figura 30.** Medición con Digitel en G-NetTrack.  
Fuente: G-Net Track.



**Figura 31.** Medición con Digitel en G-NetTrack.

Fuente: G-Net Track.

El último programa **Network Cell** nos refleja cálculos similares a los ya obtenidos anteriormente.



**Figura 32.** Medición con Digitel en Network Cell Info.

Fuente: Network Cell Info.

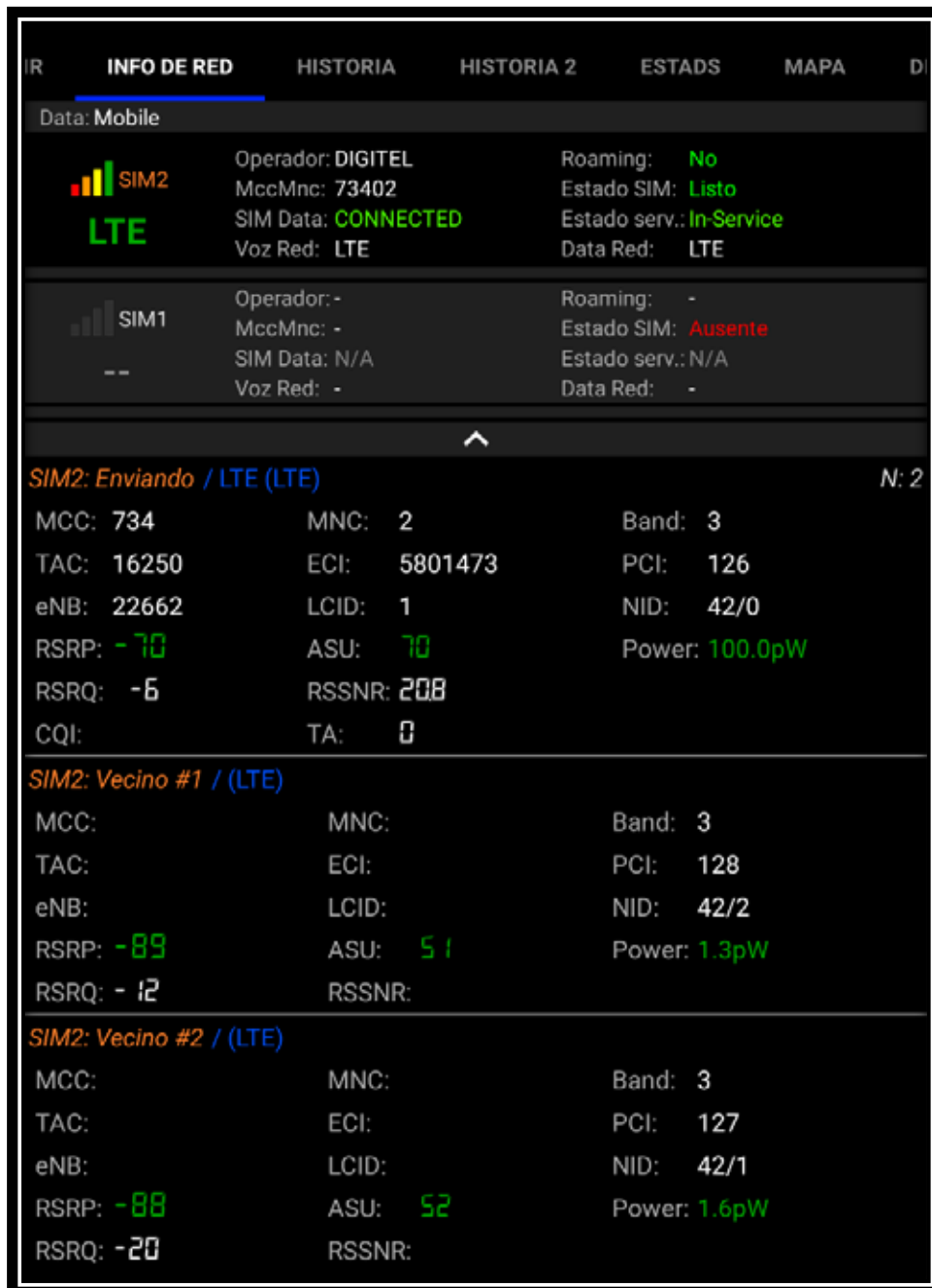
Se procedió de la misma manera con el programa para poder reflejar distintas mediciones obtenidas en la **Tabla 4**.

<b>Network Cell Info Lite</b>							
<b>MCC</b>	734	734	734	734	734	734	734
<b>MNC</b>	02	02	02	02	02	02	02
<b>TAC</b>	16250	16250	16250	16250	16250	16250	16250
<b>eNB</b>	22662	22662	22662	22662	22662	22662	22662
<b>PCI</b>	126	126	126	126	126	126	126
<b>CID</b>	1	1	1	1	1	1	1
<b>RSRP</b>	-72dBm	-71dBm	-73dBm	-70dBm	-68dBm	-71dBm	-67dBm
<b>RSRQ</b>	-7 dB	-6 dB	-188 dB	-6 dB	-7 dB	-6 dB	-8 dB
<b>RSSNR</b>	11.8 dB	20.2dB	18 dB	16.2 dB	16.2 dB	16.8 dB	23.6 dB
<b>EARFCN</b>	1350M Hz	1350M Hz	1350M Hz	1350M Hz	1350M Hz	1350M Hz	1350M Hz
<b>f</b>	1820M Hz	1820M Hz	1820M Hz	1820M Hz	1820M Hz	1820M Hz	1820M Hz

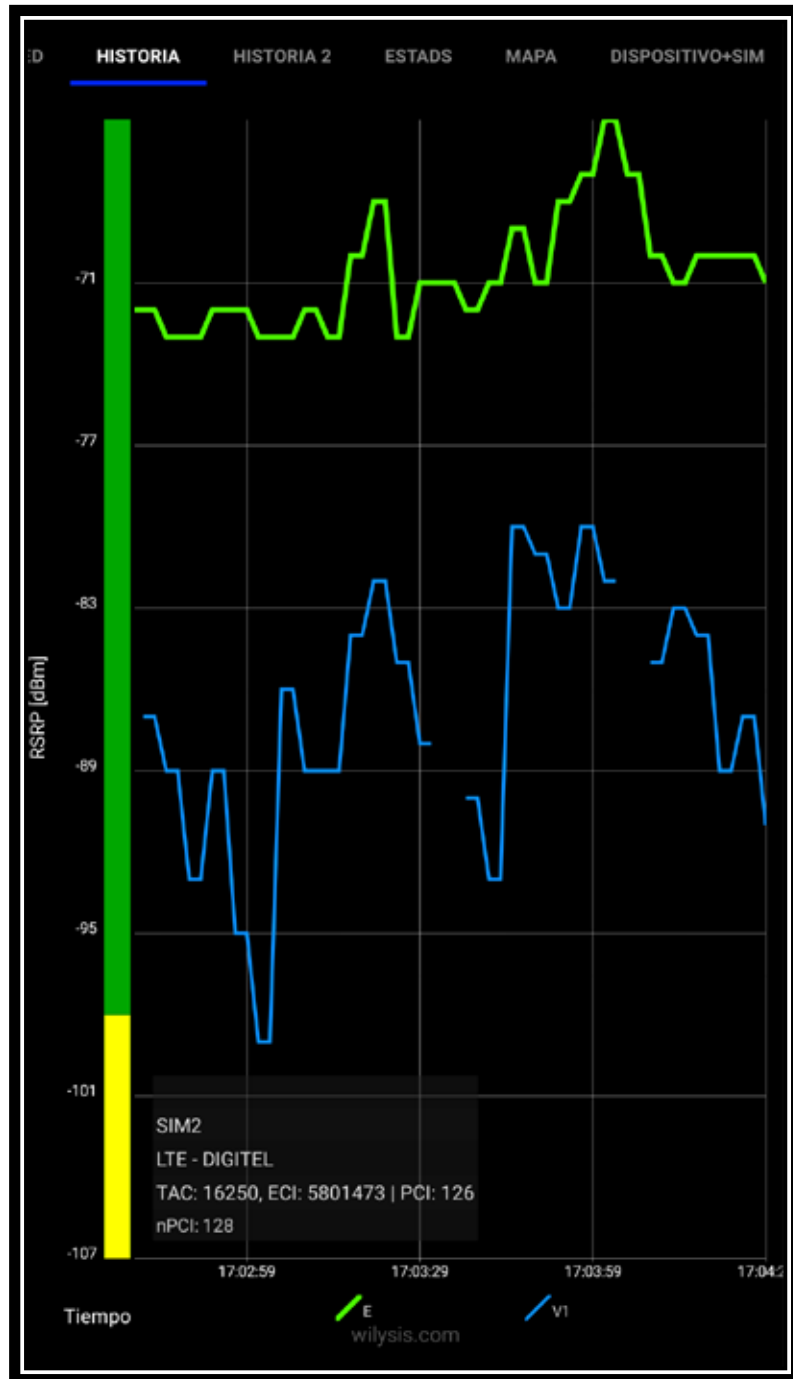
**Tabla 4.** Mediciones obtenidas desde la Universidad José Antonio Páez por Network Cell Info.

Fuente: Luque y Tatasciore (2019).

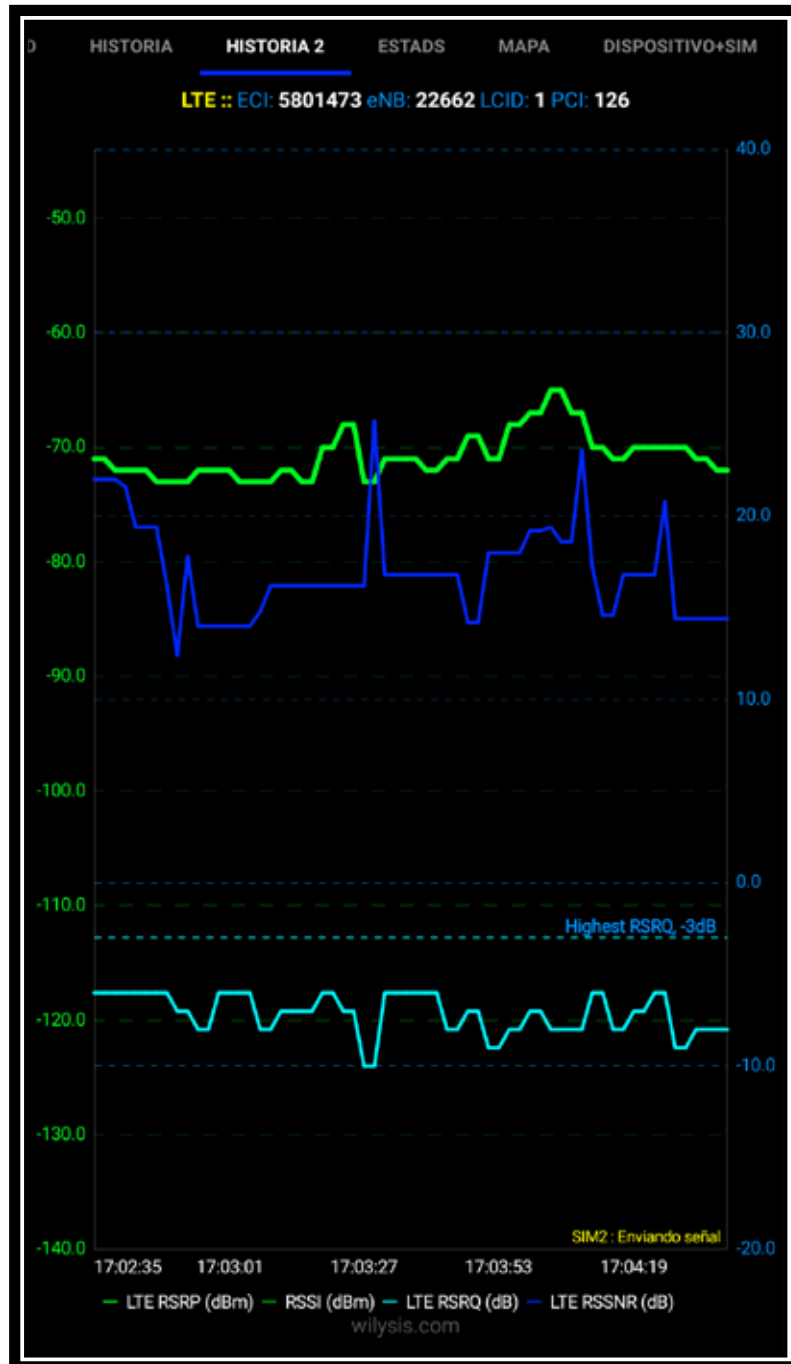
Otras opciones que nos arroja el programa son las siguientes que se muestran a continuación:



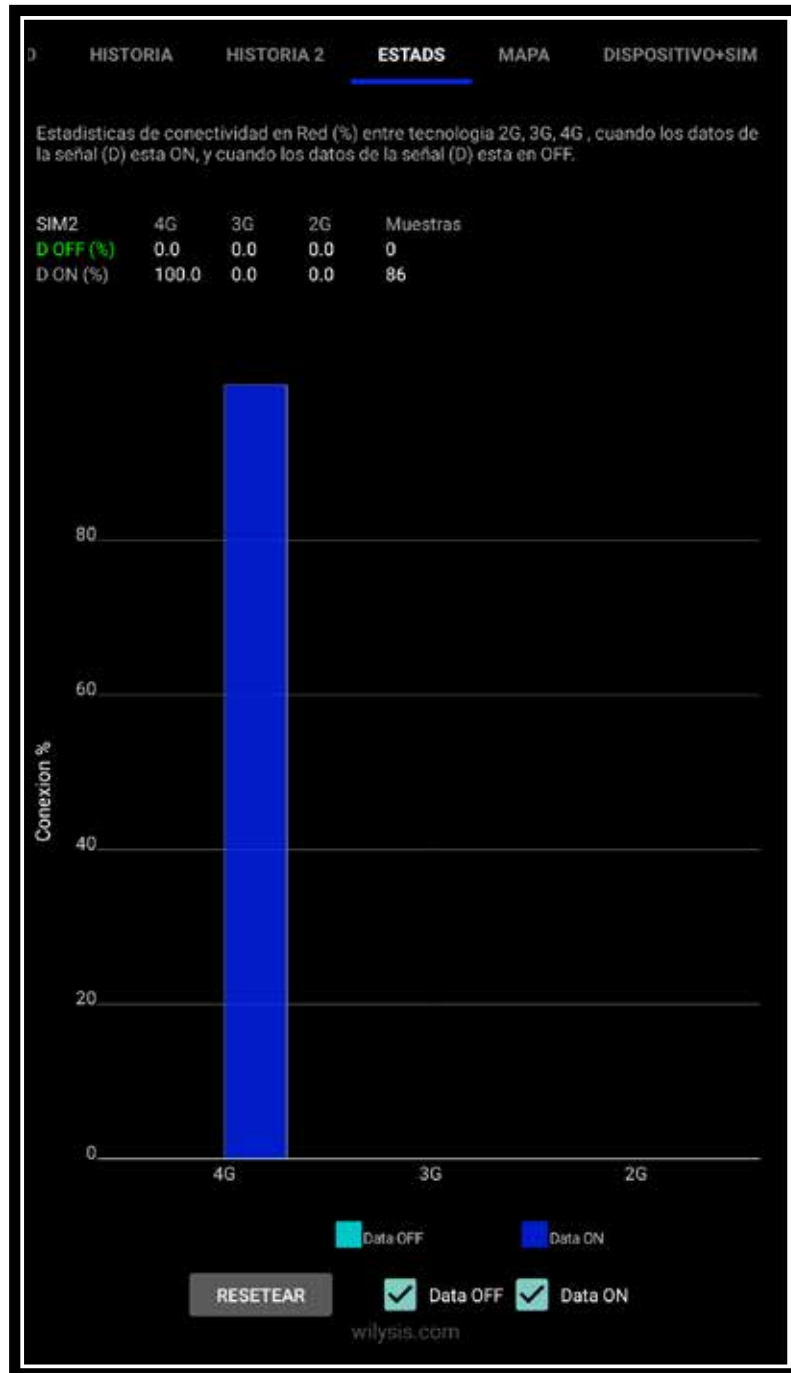
**Figura 33.** Medición con Digitel en Network Cell Info.  
Fuente: Network Cell Info.



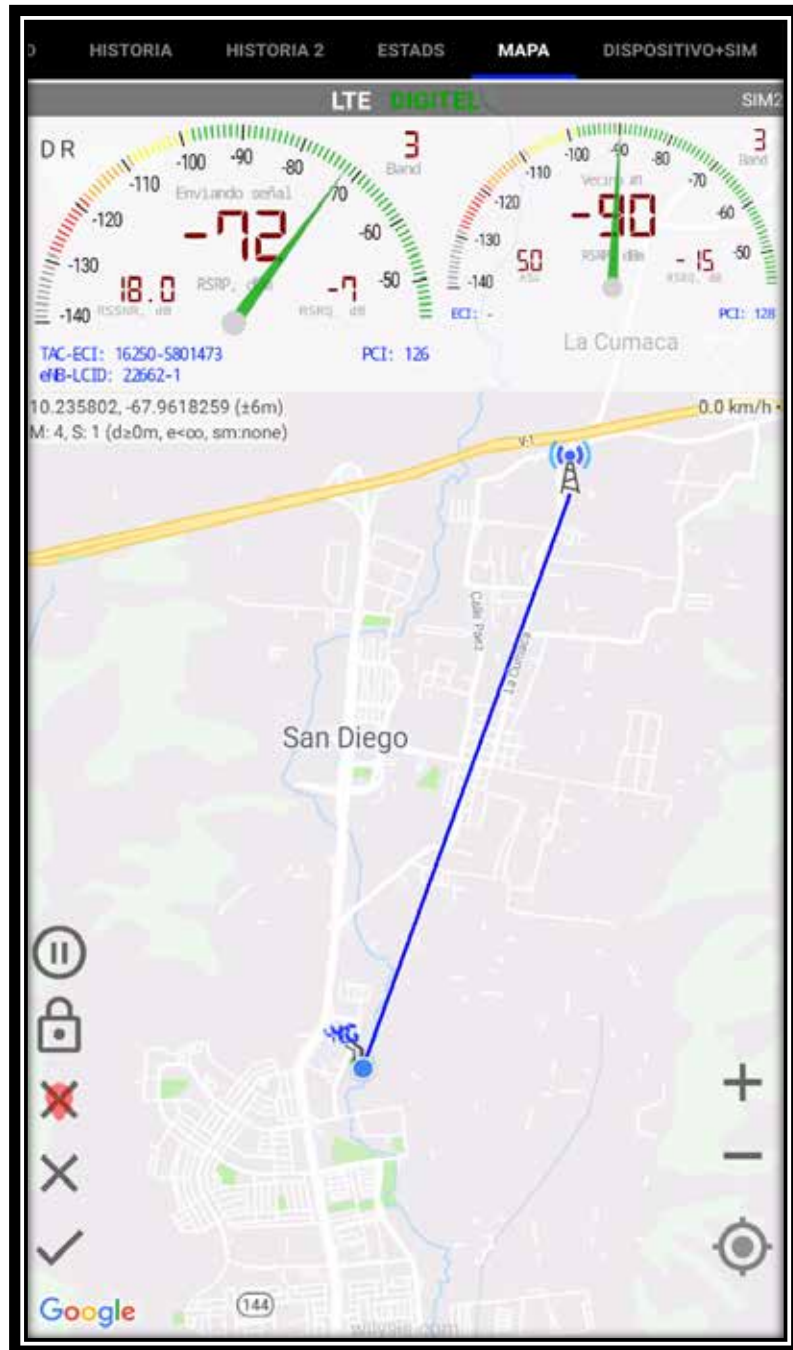
**Figura 34.** Medición con Digitel en Network Cell Info.  
Fuente: Network Cell Info.



**Figura 35.** Medición con Digitel en Network Cell Info.  
Fuente: Network Cell Info.

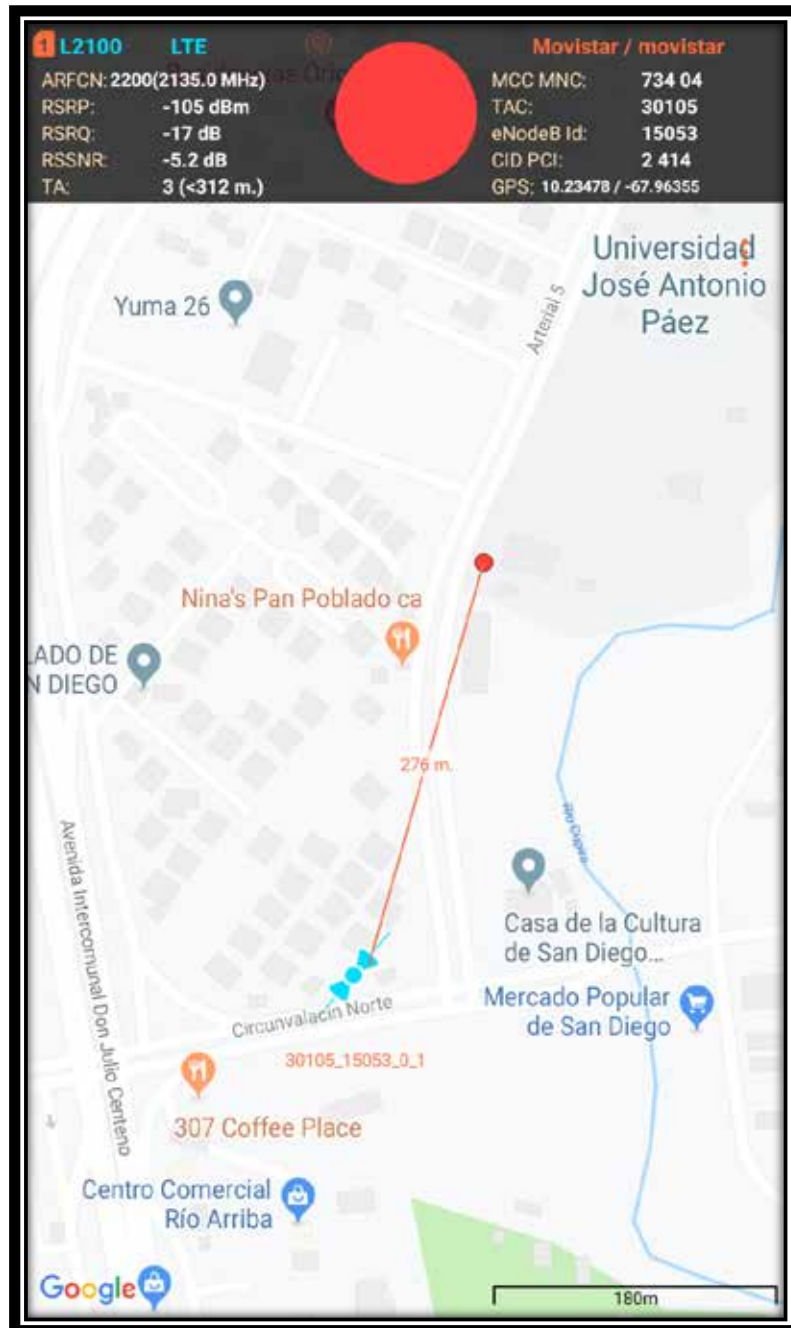


**Figura 36.** Medición con Digitel en Network Cell Info.  
Fuente: Network Cell Info.



**Figura 37.** Medición con Digitel en Network Cell.  
Fuente: Network Cell.

A su vez también logramos obtener los mismos cálculos con la operadora **Movistar**, dichos cálculos son los siguientes:



**Figura 38.** Medición con Movistar en Cell Tower Locator.  
Fuente: Cell Tower Locator.

Se lograron obtener diversas mediciones con dicho programa, tomando como referencia la misma ubicación y se reflejara en la **Tabla 5**.

Cell Tower Locutor							
<b>MCC</b>	734	734	734	734	734	734	734
<b>MNC</b>	04	04	04	04	04	04	04
<b>TAC</b>	30105	30105	30105	30105	30105	30105	30105
<b>eNB</b>	15053	15053	15053	15053	15053	15053	15053
<b>PCI</b>	416	416	416	416	416	416	416
<b>CID</b>	1	1	1	1	1	1	1
<b>RSRP</b>	-107dBm	-109dBm	-110dBm	-111dBm	-112dBm	-106dBm	-112dBm
<b>RSRQ</b>	-15 dB	-17 dB	-18 dB	-16 dB	-15 dB	-12 dB	-14 dB
<b>RSSNR</b>	0.4dB	-4.0dB	-4.6 dB	-2.2 dB	-5.0 dB	6.0 dB	0.4 dB
<b>EARFCN</b>	2200MHz	2200MHz	2200MHz	2200MHz	2200MHz	2200MHz	2200MHz
<b>f</b>	2135MHz	2135MHz	2135MHz	2135MHz	2135MHz	2135MHz	2135MHz

**Tabla 5.** Mediciones obtenidas desde la Universidad José Antonio Páez.

Fuente: Luque y Tatasciore (2019).

Con el siguiente programa G-NetTrack tenemos

Operator: movistar									
MCC:734	MNC:04	TAC:30105	Type:LTE						
eNB:15035	CID:1	PCI:425	F:2200	B:L4	TA:4				
RSRP:-105	RSRQ:-16	SNR:-1.8	CQI:-	RSSI:-74					
Longitude:-67.96172					Latitude:10.235797				
Speed:0km/h					GPS Accuracy:11m				
Height:0m			Altitude:0m			Ground:0m			
UL: 0 kbps		DL: 11 kbps							
Data: movistar-LTE				DATA					
Serving time: 92s									
TIME	EVENT	AC	CELLID	CI	ARFCN	LEVEL	QUAL	TYPE	SERV
17:27:25		30105	15035-1	425	2200	-107	-15	4G	

**Figura 39.** Medición con Movistar en G-NetTrack.

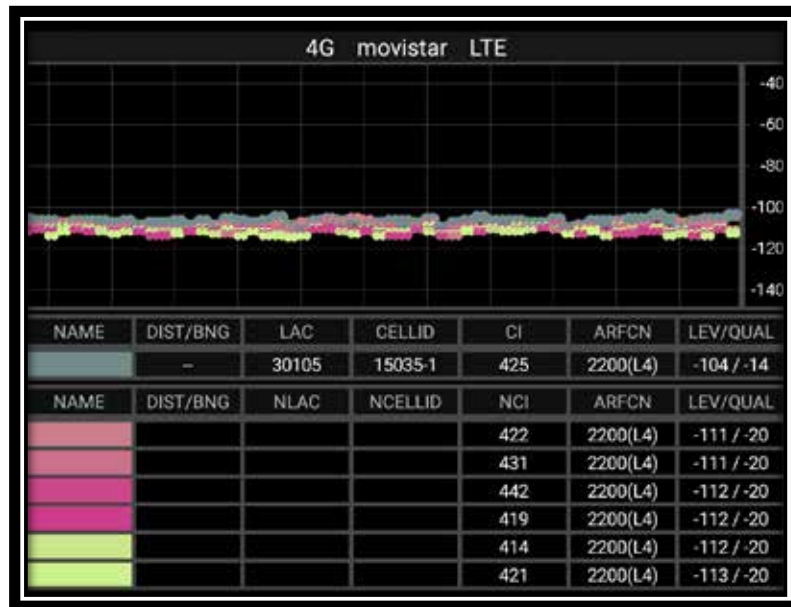
Fuente: G-Net Track.

Se procedió de la misma manera con el programa G-NetTrack para poder reflejar distintas mediciones obtenidas en la siguiente **Tabla 6**.

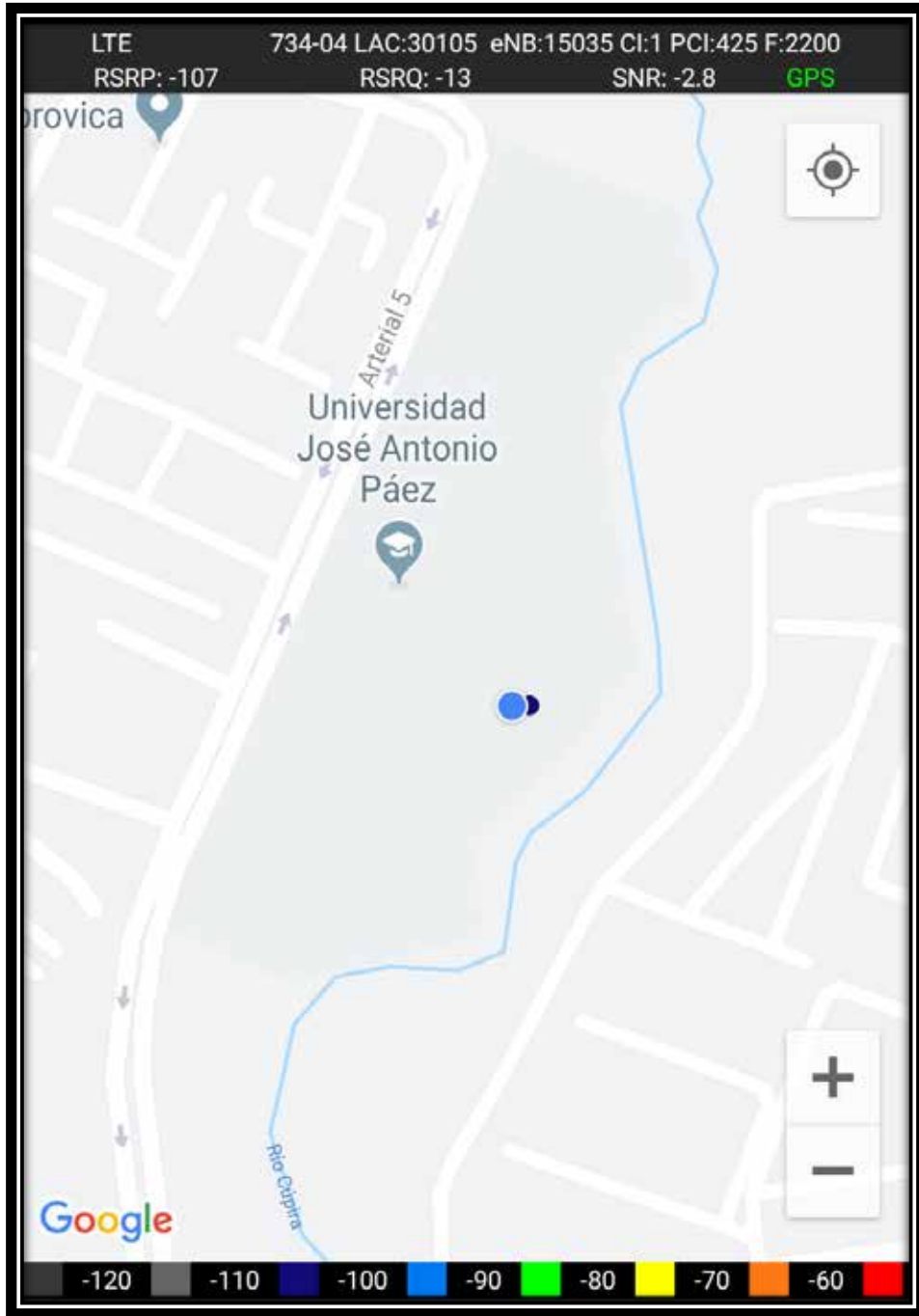
G-NetTrack							
MCC	734	734	734	734	734	734	734
MNC	04	04	04	04	04	04	04
TAC	30105	30105	30105	30105	30105	30105	30105
eNB	15035	15035	15035	15035	15035	15035	15035
PCI	425	425	425	425	425	425	425
CID	1	1	1	1	1	1	1
RSRP	-106dBm	-107dBm	-108dBm	-107dBm	-111dBm	-107dBm	-106dBm
RSRQ	-15 dB	-11 dB	-19 dB	-17 dB	-18 dB	-14 dB	-14 dB
RSSNR	-2.6 dB	0.8 dB	-7.8 dB	-7.4 dB	-7.6 dB	-1.8 dB	-6 dB
RSSI	-74 dBm	-73 dBm	-74 dBm	-74 dBm	-74 dBm	-74 dBm	-75 dBm
EARFCN	1350MHz	1350MHz	1350MHz	1350MHz	1350MHz	1350MHz	1350MHz
f	1820MHz	1820MHz	1820MHz	1820MHz	1820MHz	1820MHz	1820MHz

**Tabla 6.** Mediciones obtenidas desde la Universidad José Antonio Páez.  
Fuente: Luque y Tatasciore (2019).

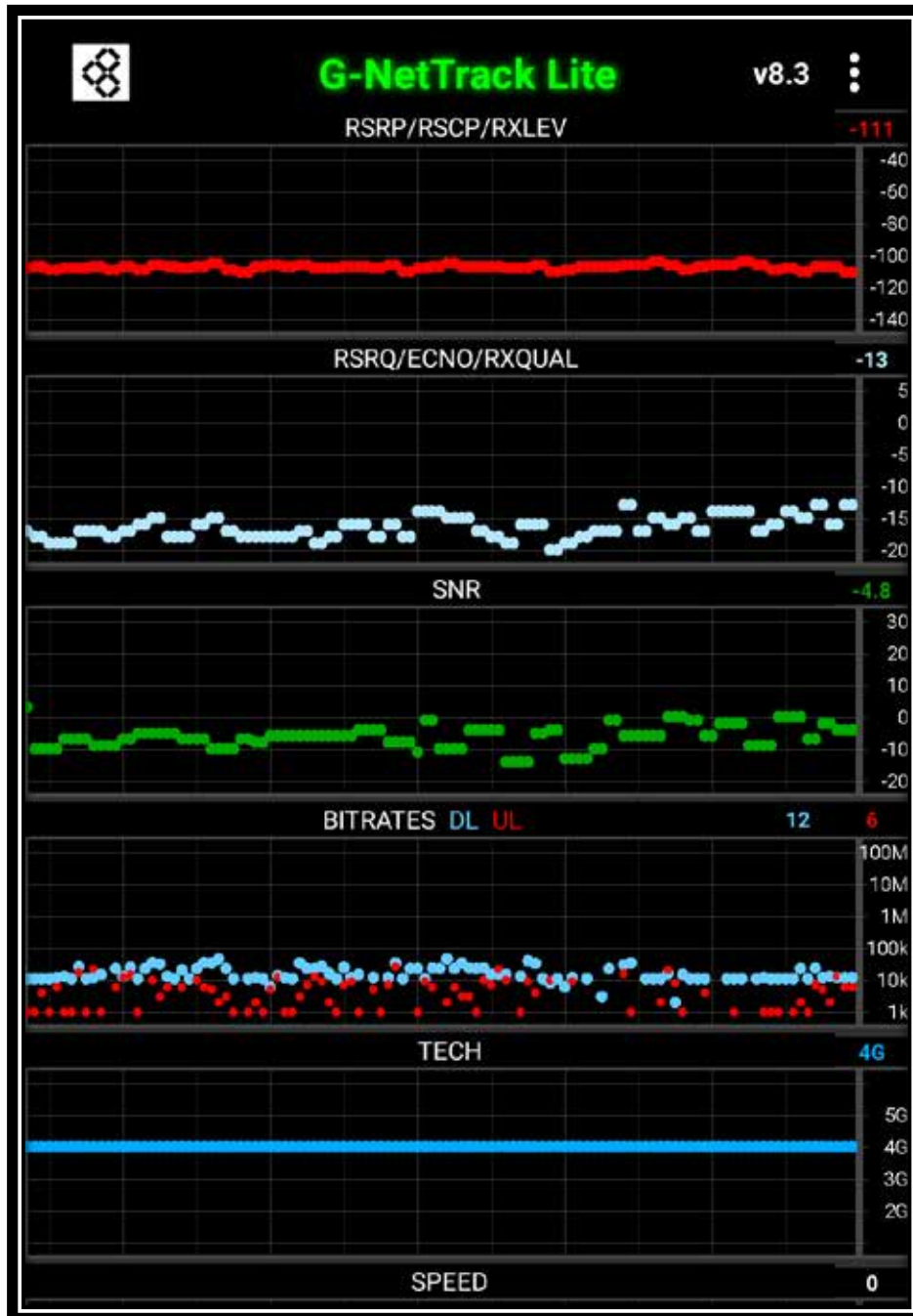
Otros de los parámetros que arrojó el programa fueron:



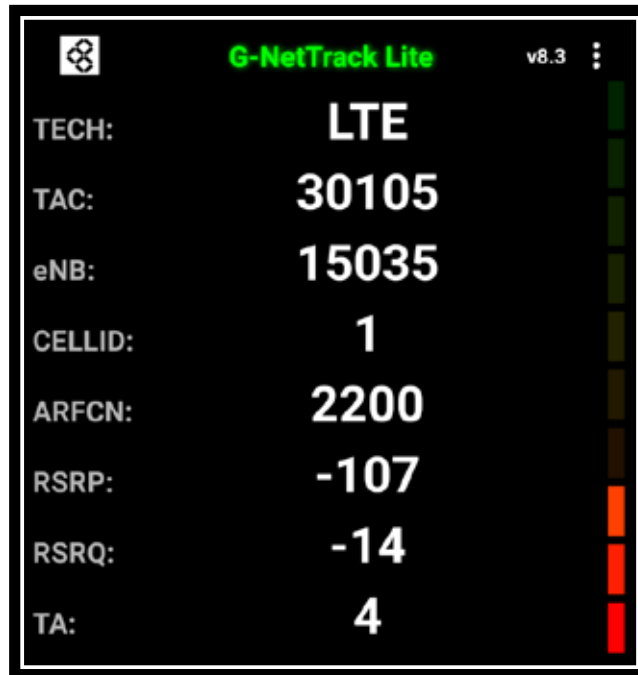
**Figura 40.** Medición con Movistar en G-NetTrack.  
Fuente: G-Net Track.



**Figura 41.** Medición con Movistar en G-NetTrack.  
Fuente: G-Net Track.



**Figura 42.** Medición con Movistar en G-NetTrack.  
Fuente: G-Net Track.



**Figura 43.** Medición con Movistar en G-NetTrack.  
Fuente: G-Net Track.

El último programa Network Cell nos refleja cálculos similares a los ya obtenidos anteriormente.



**Figura 44.** Medición con Movistar en Network Cell.  
Fuente: Network Cell.

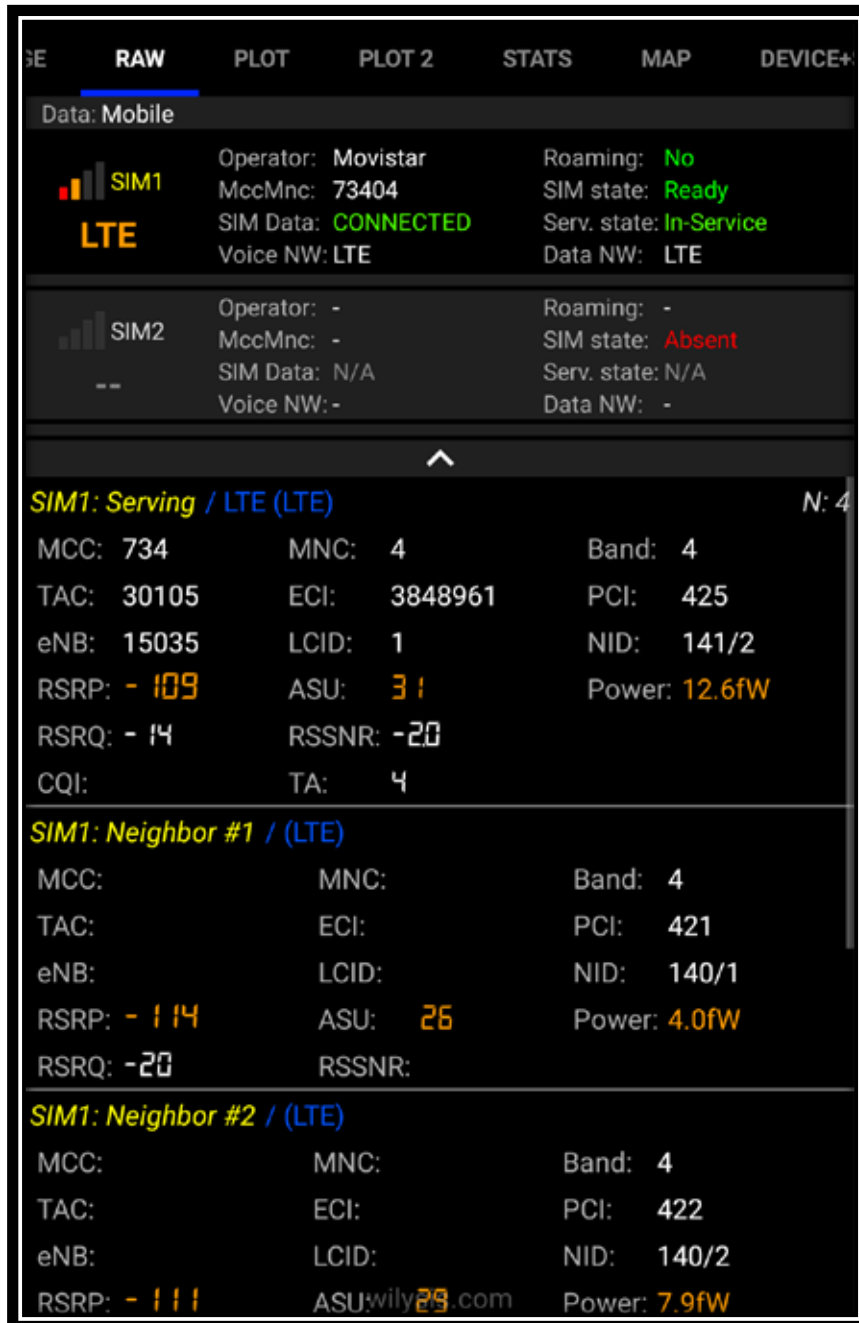
Se procedió de la misma manera con el programa anterior para poder reflejar distintas mediciones obtenidas el cual se reflejan en la **Tabla 7**.

<b>Network Cell Info</b>							
<b>MCC</b>	734	734	734	734	734	734	734
<b>MNC</b>	04	04	04	04	04	04	04
<b>TAC</b>	30105	30105	30105	30105	30105	30105	30105
<b>eNB</b>	15035	15035	15035	15035	15035	15035	15035
<b>PCI</b>	425	425	425	425	425	425	425
<b>CID</b>	1	1	1	1	1	1	1
<b>RSRP</b>	- 105dBm	- 106dBm	- 107dBm	- 104dBm	- 108dBm	- 109dBm	- 110dBm
<b>RSRQ</b>	-14 dB	-14 dB	-12 dB	-11 dB	-11 dB	-13 dB	-20 dB
<b>RSSNR</b>	-3.4 dB	-3.6 dB	3.4 dB	-4.2 dB	2.2 dB	-0.4 dB	-5.8 dB
<b>EARFCN</b>	1350M Hz	1350M Hz	1350M Hz	1350M Hz	1350M Hz	1350M Hz	1350M Hz
<b>f</b>	2200M Hz	2200M Hz	2200M Hz	2200M Hz	2200M Hz	2200M Hz	2200M Hz

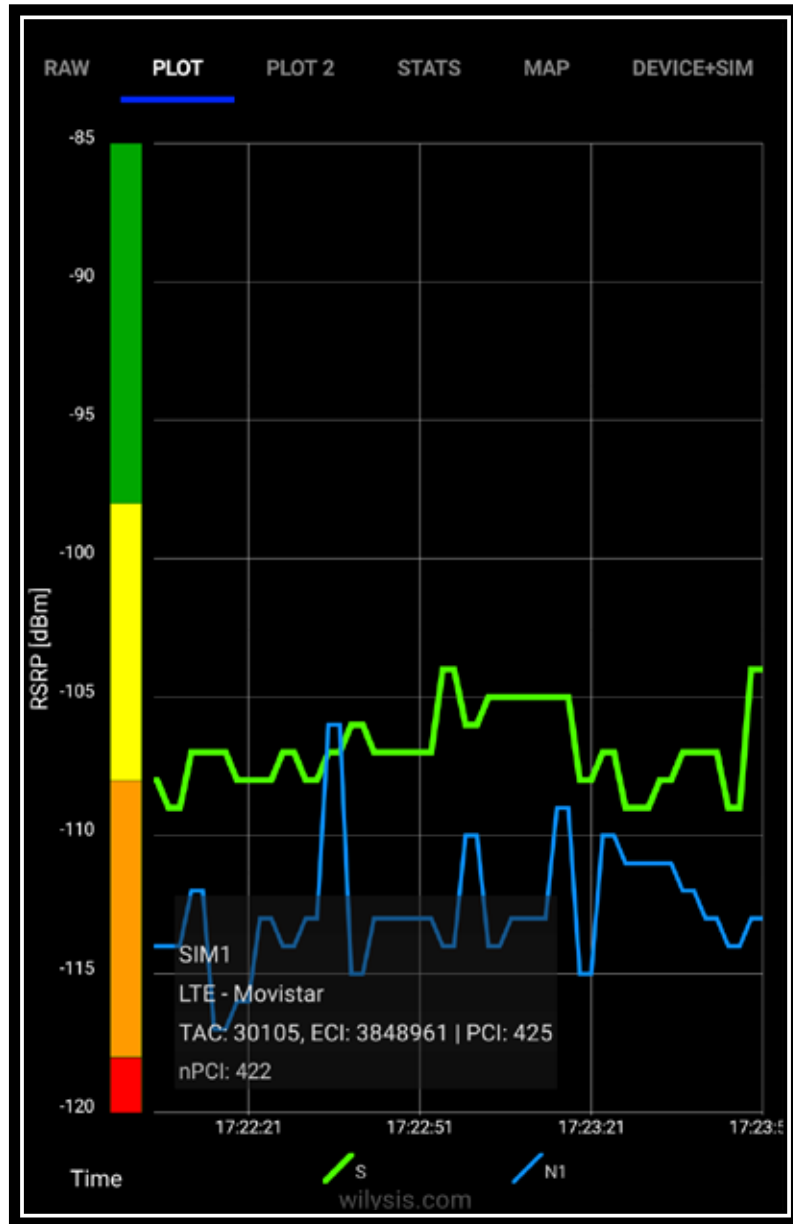
**Tabla 7.** Mediciones obtenidas desde la Universidad José Antonio Páez por Network Cell Info.

Fuente: Luque y T Fuente: Luque y Tatasciore (2019).

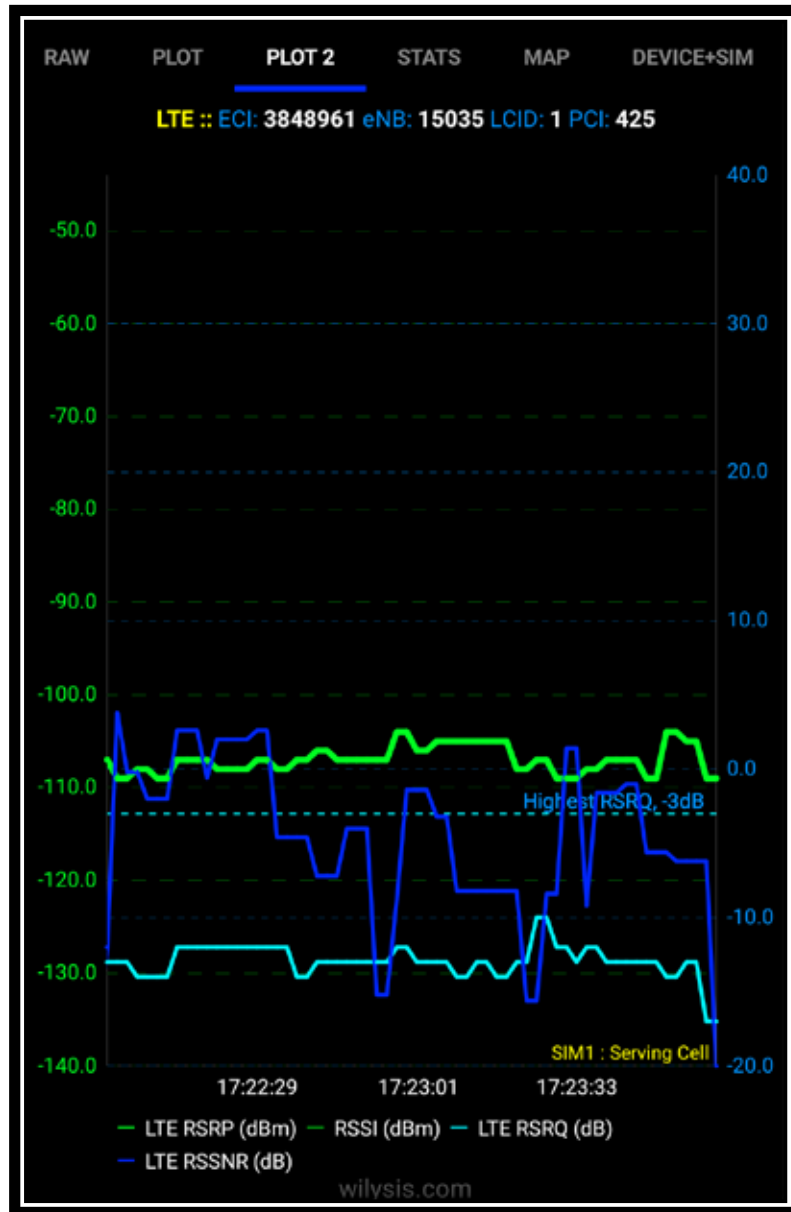
Otras opciones que nos arroja el programa son las siguientes que se muestran a continuación:



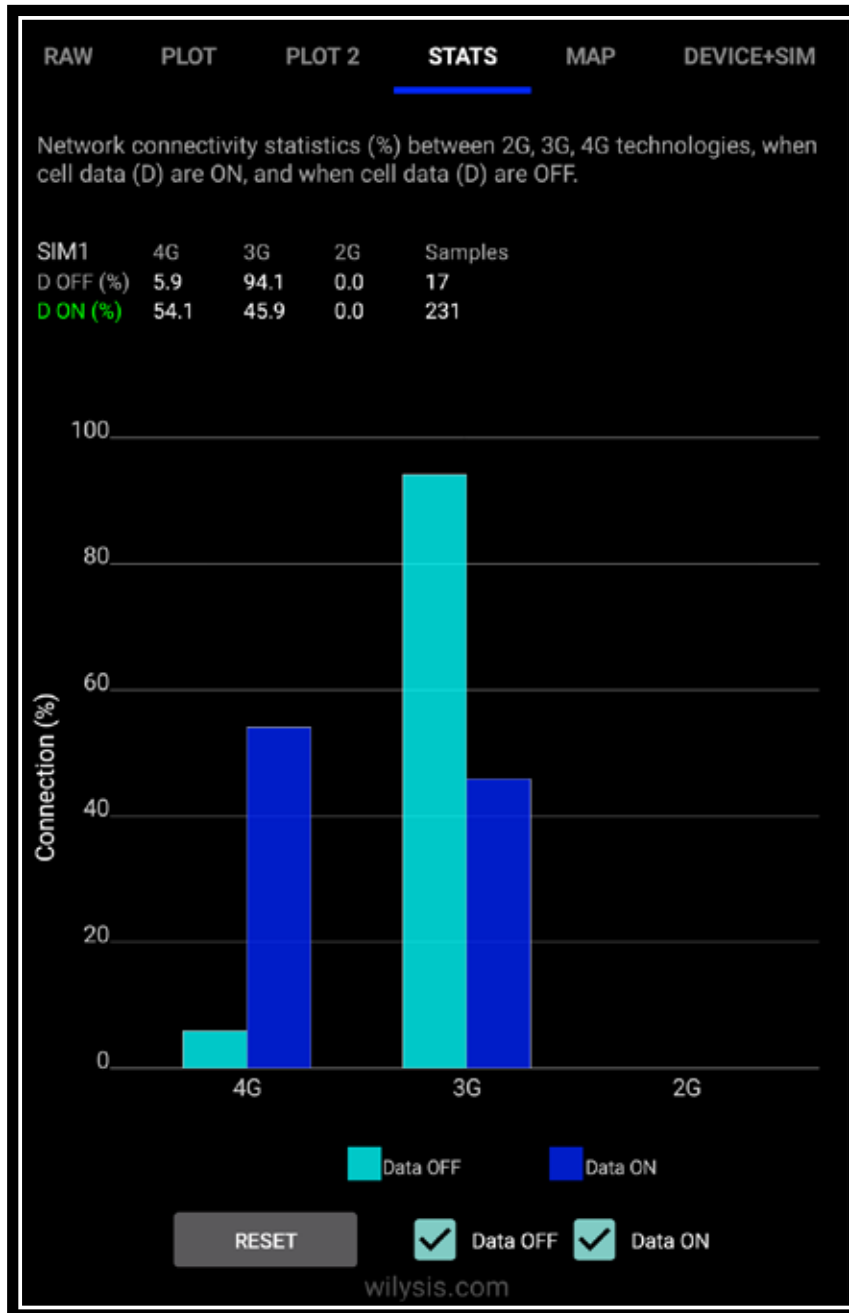
**Figura 45.** Medición con Movistar en Network Cell.  
Fuente: Network Cell.



**Figura 46.** Medición con Movistar en Network Cell.  
Fuente: Network Cell.



**Figura 47.** Medición con Movistar en Network Cell.  
Fuente: Network Cell.



**Figura 48.** Medición con Movistar en Network Cell.  
Fuente: Network Cell.



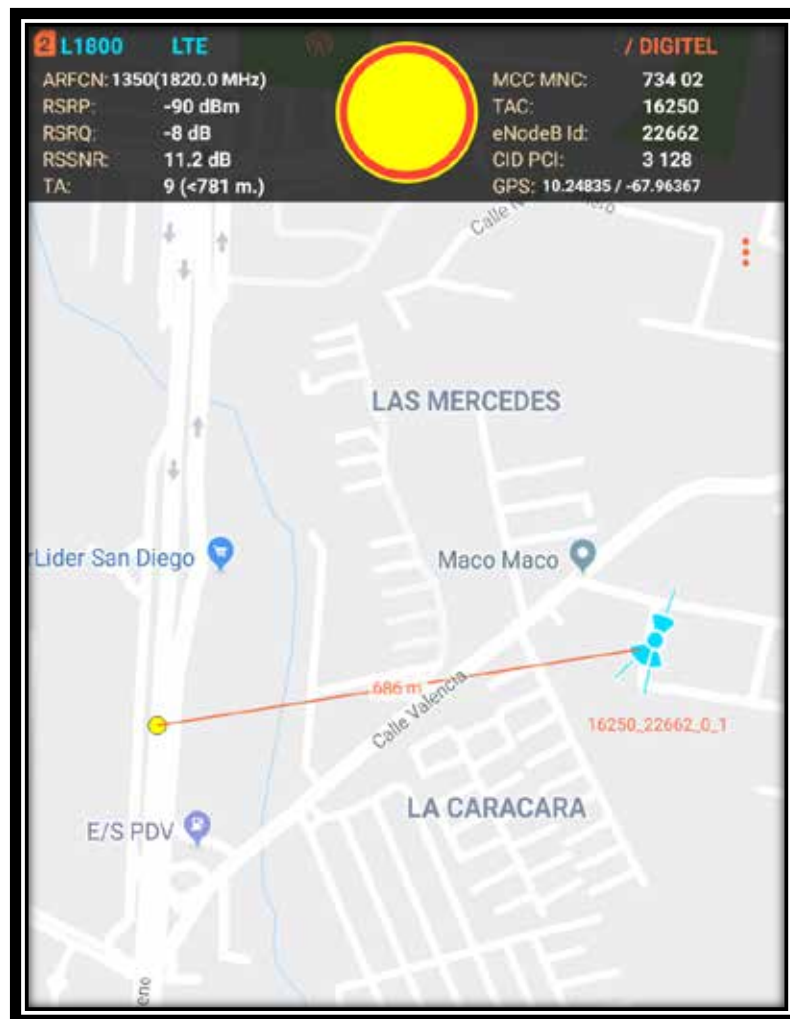
**Figura 49.** Medición con Movistar en Network Cell.  
Fuente: Network Cell.

#### 4.4 Fase IV: Determinación de la propagación de la señal 4G con los resultados obtenidos de la simulación.

En la presente fase, se determinó la distancia óptima del móvil respecto a la celda para el mantenimiento del enlace, buscando de esta manera los puntos muertos

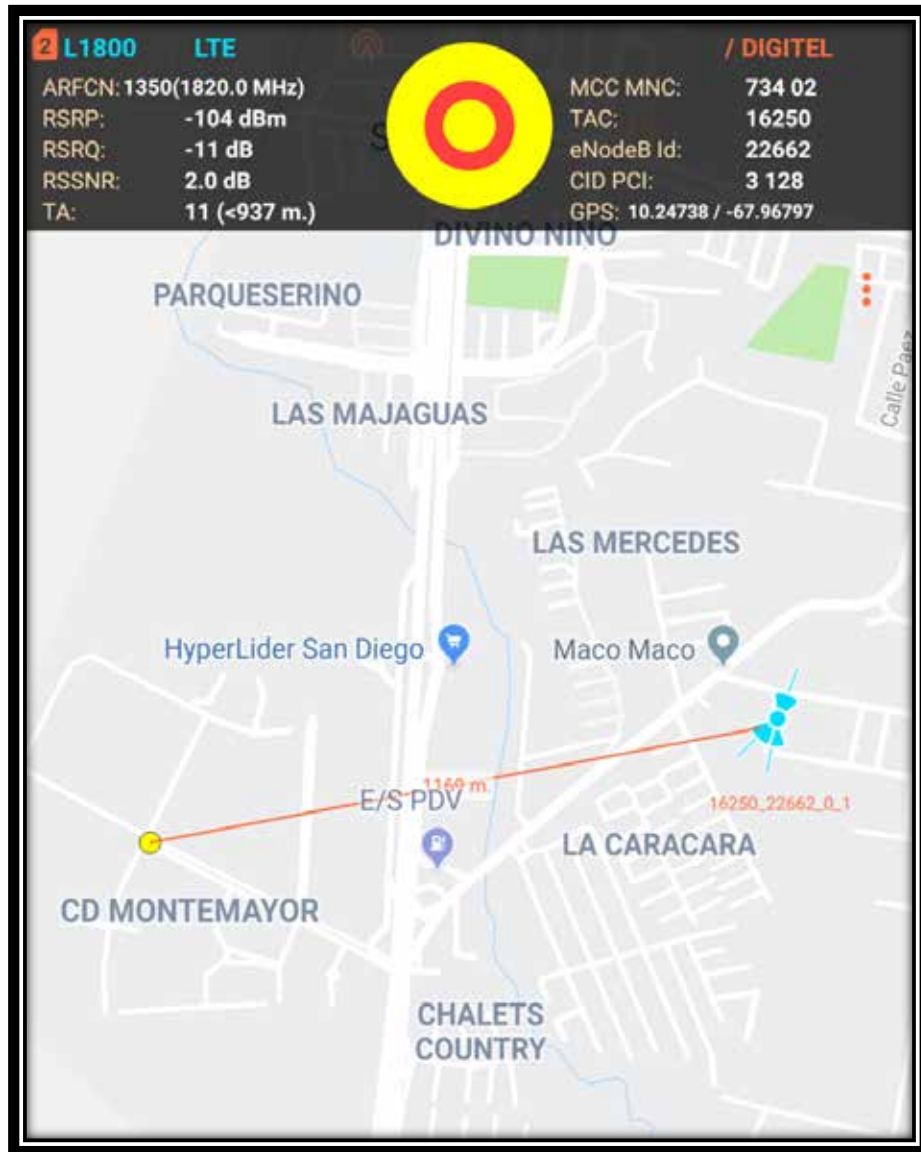
ó aquellas zonas donde ocurriese el traspaso entre celdas. Para ello, se realizó un recorrido por las adyacencias de San Diego, obteniéndose lo siguiente (véase **Figura 50**, **Figura 51** y **Figura 52**):

En la **Figura 50** se aprecia que a la altura entre el HiperLider y la estación de servicio PDV se establece un enlace con la radiobase de la Caracara, con -90dBm.



**Figura 50.** Medición con Digitel de Cell Tower Locator.  
Fuente: Cell Tower Locator.

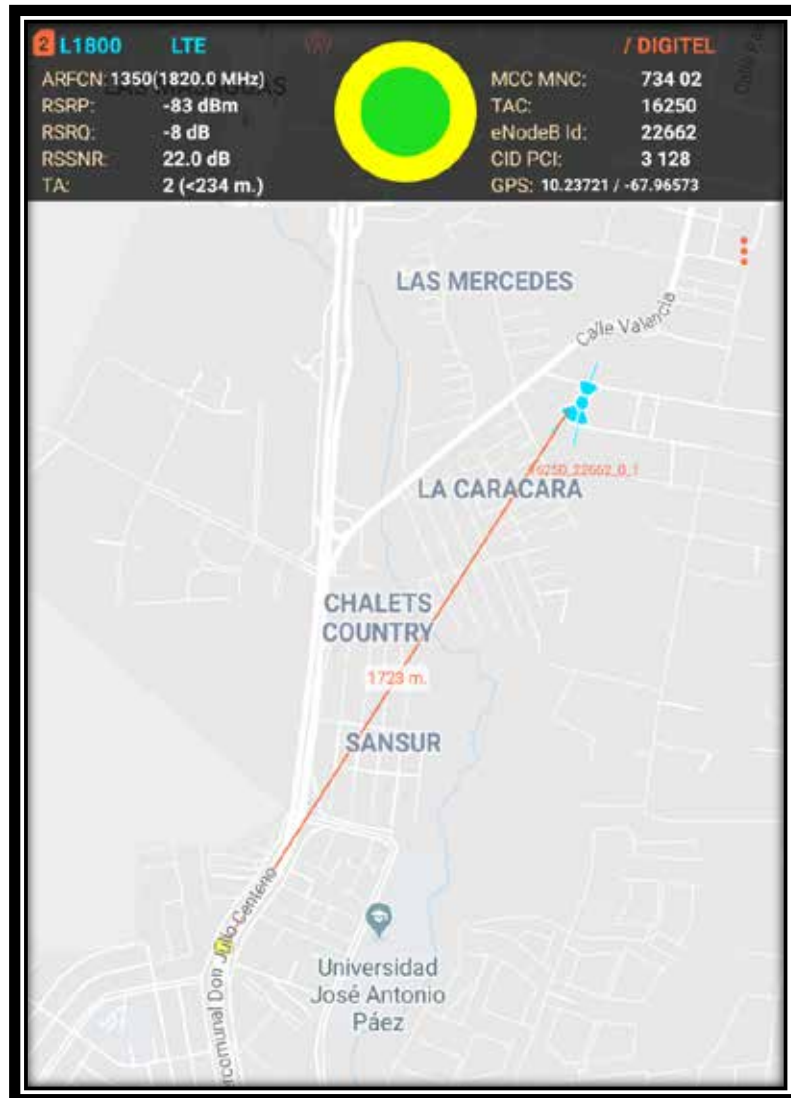
En la **Figura 51** el enlace se mantiene con -104dBm a 1170m, disminuyendo así la potencia recibida a medida que se aleja el dispositivo móvil en dirección a Montemayor.



**Figura 51.** Medición con Digitel de Cell Tower Locator.

Fuente: Cell Tower Locator.

En la **Figura 52** el enlace sigue manteniéndose, en esta ocasión con -83dBm a 1723m, a la altura de la Universidad José Antonio Páez, pero está cerca del borde de la celda ya que a dicha altura realiza el cambio de enlace a la BTS ubicada en la Esmeralda. Posteriormente, 300m más adelante se mantuvo la conexión.



**Figura 52.** Medición con Digitel de Cell Tower Locator.  
Fuente: Cell Tower Locator.

## CONCLUSIONES

Por medio de este estudio se dieron a conocer las distintas especificaciones y limitantes de cada modelo derivado de Okumura, llegándose a la conclusión de que el modelo más adecuado para la frecuencia de trabajo es el COST 231-Hata, debido a que fue diseñado para su empleo entre 150MHz y 1920MHz, superando las restricciones en el modelo Hata. Sin embargo, el modelo Hata aún puede ser aplicable y extrapolado a frecuencias alrededor de los 2000MHz, volviéndolo uno de los más aplicables y con mayor uso en la actualidad.

La formulación implementada en el presente trabajo de grado resultó ser la de ciudad urbana pequeña - mediana, debido a que la población presente no resulta ser numerosa ó densa, ni hay cantidades de edificaciones ni de industrias ó empresas que puedan afectar en gran medida a los valores medidos.

Comparando dicha formulación con los valores obtenidos de las aplicaciones para la red de Digitel no resultó ser muy grande la diferencia (1-2dBm), caso contrario con Movistar, donde la variación resultaba ser mucho más notoria. Dicha variación podía oscilar entre 20dBm y 25dBm, lo cual puede bien deberse a varias razones: la plataforma de Digitel se encuentra más consolidada en el municipio San Diego que Movistar en lo que a infraestructura 4G se refiere. Claro está de que existen muchos factores que afectan negativamente al trayecto de la señal y que se deben tomar en cuenta, bien puede ser absorción por el clima, efecto multitrayecto, reflexiones, etc. Okumura-Hata con su estudio hasta 1920MHz el cual abarca en la banda donde opera Digitel por ende la comparación practica teórica es buena aproximación en comparación del cálculo con Movistar.

Los valores obtenidos por las BTS variaban, en el sentido de que no siempre se conectaba a una misma radiobase, siempre varió la conexión. Por algunas veces que se alejara ó acercara de la estructura el establecimiento del enlace resultó ser nulo con Movistar, por lo que el estudio se basó en su mayoría con la línea Digitel. Con esta operadora y a una distancia de 1.57Km. El enlace se interrumpía y se establecía

con las BTS aledañas, pudiéndose tratar de un proceso de handover. Por otra parte, el estudio con el BTS de igual manera se quiso llevar a cabo con la operadora Movistar para comparar el comportamiento, pero nunca se logró enganchar con esta. De igual manera, puede tratarse de que los canales asignados a tal celda se ocuparan, llevando a que el enlace no pudiera concretarse y saltase hacia otra.

## RECOMENDACIONES

- Evaluar con cual compañía telefónica hacer vida en función del lugar de residencia y/o trabajo, ya que bien se sabe un teléfono inteligente es una herramienta de suma importancia tanto social como económicamente, y sería una pena no contar con un servicio de datos en una zona donde no haya cobertura.
- Se sabe muy bien que la situación de Venezuela en la actualidad es crítica, y que las inversiones por parte de empresas grandes se piensan dos veces. Los constantes cortes eléctricos dificultan el día a día, y las torres de comunicaciones no se escapan de ello. Muchas de las torres pertenecientes a Movistar cuentan con plantas eléctricas a manera de levantar el sistema ante una posible falla, cuestión que muchas de las torres de Digitel carecen, dejando fuera de línea a gran parte de la población ante un corte eléctrico. Digitel como empresa en alza debe invertir en plantas generadoras, con el fin de seguir brindando un buen servicio ante cualquier contingencia.
- Diversas aplicaciones arrojan resultados de la señal recibida por un dispositivo móvil de última generación y varios de los parámetros inherentes al tipo de red móvil, pero en caso de no contar con alguna de estas instaladas en el equipo existen opciones en estos que arrojan la potencia recibida, obviando los demás factores. Por otro lado, de entre las aplicaciones utilizadas la más precisa en cuanto a la ubicación de las radiobases fué Cell Tower Locator, pero Network Cell resulta mejor en cuanto a la visualización de la variación de los distintos parámetros a lo largo del tiempo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Analuisa, J. (2014).  
Trabajo de grado. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador.
- Anguís, J. (2008).  
Trabajo de grado. Universidad de Sevilla. España.
- Arias, F. (2012).  
(6° ed.). Caracas: Episteme.
- Camacho, D. y Torres, G. (2007). Trabajo de grado.  
Instituto Politécnico Nacional. México.
- Delgado, E. (2017).  
Trabajo de Titulación, Maestría en Telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil, Ecuador.
- García L. y Mijares, H. (2007)  
Universidad José Antonio Páez.  
San Diego, Venezuela.
- Guevara, A. y Vásquez, V. (2013).  
Trabajo de grado. Universidad de Cuenca. Ecuador.
- Herradón, R. (2016).  
Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- M. Sainju, P. (2012). Tesis  
de maestría en ciencias. Universidad de tecnología de Tampere. Tampere, Finlandia.
- Mohamed, I. (2017). **Path-Loss Estimation for Wireless Cellular Networks Using Okumura/Hata Model.** Artículo científico. Science Journal of Circuits,

Systems and Signal Processing, 7(1), 20-27. doi:  
10.11648/j.cssp.20180701.13

Nossire, Z.; Gupta, N.; Almazaydeh, L. y Xiong, X. (2018). **New Empirical Path Loss Model for 28 GHz and 38 GHz MillimeterWave in Indoor Urban under Various Conditions**. Applied sciences, 8 (2122), 1-14.

Pedraza, L. (2016).

Trabajo

de grado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Quiñones, L. (2016).

Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Cataluña.

Cataluña, España.

Quistial, A.; Lupera, P.; Tipantuña, C. y Carvajal, J. (2018). **Modelo matemático adaptado para el cálculo de pérdidas de propagación en la banda de 900MHz para Microceldas en la ciudad de Quito**. Artículo de investigación. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Oyubu, A.O. (2016). **A comparative study of free space and Okumura-Hata models in GSM signal path loss prediction in south-south Nigeria**. International Journal of Advancements in Research & Technology, 5(2), 34-44.

Rappaport, T.S., (2002). . (2nd. Ed.)

New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

Rodríguez, J. D.; Bautista, J. y Sotomonte, L. (s. f.).

. Universidad

Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Sabino, C. (1992). Caracas: Panapo.

Téllez, T. (2013).

Trabajo de Grado. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, España.

## REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- Android Venezuela. (2017). **Conoce las Bandas de las Operadoras Venezolanas (Actualizado, 2019)**, consultado el 7 de abril de 2019 desde: **<https://www.androidvenezuela.com/android/conoce-las-bandas-de-las-operadoras-venezolanas>**
- Capera, E. (s/f). **Tecnologías UMTS y LTE**, consultado el 2 de abril de 2019 desde: **[https://www.academia.edu/5935099/Tecnolog%C3%ADas\\_UMTS\\_y\\_LTE](https://www.academia.edu/5935099/Tecnolog%C3%ADas_UMTS_y_LTE)**
- Digitel C.A. (s/f). **Cobertura 4G LTE**, consultado el 5 de abril de 2019 desde: **<http://www.digitel.com.ve/digitelenelmapa/>**
- Ecured. (s/f). **Tutorial LTE**, consultado el 1 de abril de 2019 desde: **[http://www.ipv6go.net/lte/estructura\\_trama\\_lte.php](http://www.ipv6go.net/lte/estructura_trama_lte.php)**
- Ericsson. (2012). Mobile Data vs. Voice Usage**, consultado el 2 de abril de 2019 desde: **<https://kk.org/extrapolations/mobile-data-vs-voice-usage/>**
- IEEE Explore. (1.998). **Application of IFDMA to Mobile Radio Transmission**, consultado el 3 de abril de 2019 desde: **[https://www.researchgate.net/publication/3781572\\_Application\\_of\\_IFDMA\\_to\\_Mobile\\_Radio\\_Transmission](https://www.researchgate.net/publication/3781572_Application_of_IFDMA_to_Mobile_Radio_Transmission)**
- ITU. (2019). **ICT Statistics**, consultado el 3 de abril de 2019 desde: **World Telecommunication/ICT Indicators Database**
- Ludditus. (2016). **4G is meant to kill the last trace of common sense in communications**, consultado el 4 de abril de 2019 desde: **<https://ludditus.com/2016/09/07/4g-is-meant-to-kill-the-last-trace-of-common-sense/>**
- Rodríguez, J. (2007). **¿Qué es HSUPA?**, consultado el 1 de abril de 2019 desde **<https://www.xatakamovil.com/conectividad/que-es-hsupa>**
- Rouse, M. (2016). **4G is meant to kill the last trace of common sense in communications**, consultado el 3 de abril de 2019 desde: **<https://ludditus.com/2016/09/07/4g-is-meant-to-kill-the-last-trace-of-common-sense/>**