



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE RADIO
FRECUENCIA EN REDES 5G
UTILIZANDO EL MODELO
OKUMURA-HATA.**

Autores: Diaz M. Rossana M.
C.I 21.021.566

Urb. Yuma II, Calle N° 3, Municipio San Diego
Teléfono: 0241-8714240 (Master) Fax: 0241-8712394



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

**ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE RADIO FRECUENCIA EN
REDES 5G UTILIZANDO EL MODELO OKUMURA-HATA.
Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

Autores: Diaz M. Rossana M.
C.I 21.021.566
Tutor: Ing. Pablo Barrios
C.I.: 8.667.378

San Diego, 2019



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

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Pablo Barrios portador de la cédula de identidad N°8.667.378 en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el ciudadana Rossana Maricruz Diaz Marcano portadora de la cédula de identidad N°21.021.566, titulado **ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE RADIO FRECUENCIA EN REDES 5G UTILIZANDO EL MODELO OKUMURA-HATA**, presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero de Telecomunicaciones, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los trece días del mes de septiembre del año dos mil diecinueve.

Ing. Pablo Barrios

C.I:8.667.378



FI-L -006-2019-3CR (TG)

Valencia, 09 de diciembre de 2019

Ciudadana:
Díaz M, Rossana M.
21.021.566
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 05-2019 de fecha 11-09-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE RADIO FRECUENCIA EN REDES 5G UTILIZANDO EL MODELO OKUMURA-HATA** presentado por usted (es) como requisito para optar al título de Ingeniero en Telecomunicaciones.

Se ratifica la designación del Ing. Wilmer Mendoza C.I: 22.225.097 como Tutor Académico que la asesorara 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).

Ll/a.a.

AGRADECIMIENTO

Primero que nada, dar gracias a Dios todopoderoso por siempre guiarme y darme fuerzas para superar cada uno de los obstáculos enfrentados, no solo a lo largo de mis estudios, sino también en mi vida personal; además, muchas gracias a mis padres por el apoyo para lograr mis estudios y mis objetivos.

A mi papá Simón Díaz que por siempre ha intentado ayudarme en cada momento de mi vida y sobre todo en momentos de estudios, aunque no tuviese conocimientos en algunas de las áreas de mi carrera siempre buscar la manera de ayudarme y apoyarme.

A mi mamá Roxana Marcano por siempre estar conmigo en los momentos más difíciles, por no dejar que me rinda jamás y por sus consejos.

A todas mis hermanas por siempre estar ahí cuando las necesite, ayudarme y por creer en mí siempre.

A la universidad José Antonio Páez por ayudar a formar nuevos profesionales que permitan el desarrollo de la nación para tener un mejor futuro; a cada uno de los profesores que dedicaron su tiempo enseñando y transmitiendo sus conocimientos solamente por el amor a enseñar.

A los ingenieros Rainier Blanco, Yetro Lopez, Jesus Guama y Ana Aveldano por las orientación y ayudas ocasionales en los momentos en que las necesitaba; a todos los compañeros que conocí a lo largo de mi carrera profesional que formaron parte importante en mi vida.

A mis amigos sobre todo en especial a personas que marcaron mi vida de muy buena manera, que estimo y valoro un mundo, siempre daré gracias a Dios por formar parte de mi vida y de mi carrera, por siempre apoyarme y sobre todo a ayudarme crecer como persona y profesional: Anaibel Blanco, María Arévalo, Manuel rebolledo y Adrián Fariña.

Muchas gracias a todos.....

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado A Dios primeramente por darme el don de la inteligencia y sabiduría, por siempre estar a mi lado y darme la Fuerza para perseverar y alcanzar cualquier meta establecida a lo largo de mi vida.

A mi querida y Eterna Abuela Cruz Dolores Albino de Marcano que, aunque no estás a mi lado físicamente sé que siempre me has acompañado a lo largo de mi vida y de mi carrera apoyándome, sobre todo guiándome por el buen camino, sé que siempre llevo conmigo tu bendición. Te amo abuelita.

A Karelis Aldana, primero que nada, por siempre estar ahí para mí de manera incondicional, por el apoyo constante y por nunca dejarme caer en los momentos difíciles de mi carrera y de mi vida, por siempre buscar la manera de ayudarme aunque no fuera su área de conocimiento pero nunca decaíste para darme el apoyo que necesitaba y así salir siempre adelante, pero sobre todo gracias por enseñarme a ser una mejor persona, por ayudarme a crecer día a día y a tener la fuerza necesaria para poder finalizar esta meta con mucho éxitos. Pero sobre todo gracias por formar parte de mi vida y ser muy especial para mí.

A mi mejor amigo Jesús Daniel Hernández, primero que nada, por enseñarme lo que es un verdadero amigo, por siempre estar dispuesto a ayudarme y apoyarme no solo en mi vida si no en lo largo de mi carrera y en muchas ocasiones estar hasta tarde ayudándome con cosas de la universidad, por ser un ejemplo a seguir no solo como persona si no como profesional también.

A mi mejor amiga Diana Zurita, por estar a mi lado desde los inicios de mi carrera y sobre todo en estos últimos tiempos por todo su apoyo, colaboración y ayuda para poder finalizar con éxito esta gran meta y reto en mi vida, por siempre estar hay para mí a pesar de todas mis locuras y defectos, pero sobre todo gracias por demostrarme lo que es una verdadera amistad y hermandad.

INDICE

CONTENIDO	Pág
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE GRAFICAS.....	ix
RESUMEN.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
I EL PROBLEMA.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema.....	8
1.3 Objetivos de la Investigación.....	8
1.3.1 Objetivos generales.....	8
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
1.4 Justificación de la investigación.....	8
1.5 Alcance de la Investigación.....	10
II MARCO TEÓRICO	11
2.1 Antecedentes de la Investigación.....	11
2.2 Bases Teóricas.....	12
2.2.1 Evolución de las generaciones móviles.....	13
2.2.2 Evolución de las comunicaciones móviles.....	19
2.3 Definición de términos.....	31
III MARCO METODOLÓGICO.....	34
3.1 Tipo de la Investigación.....	35
3.2 Diseño de la Investigación.....	36
3.3 Nivel de Investigación.....	36
3.4 Técnicas de Recolección de Datos.....	37
3.5 Fases de la Investigación.....	40
IV RESULTADOS	42
4.1 FASE I: Diagnosticar el alcance del modelo de propagación de Okumura Hata.....	42
4.1.1 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	43
4.1.2 Análisis los resultados.....	44
4.2 FASE II: Identificar las frecuencias usadas en 5G.....	62
4.2.1 Tecnología 5G.....	62
4.2.2 Espectro radioeléctrico para 5G.....	66

4.2.3	Bandas del espectro radioeléctrico para 5G	72
4.2.4	Características de las bandas del espectro radioeléctrico	
	para 5G	90
4.3	FASE III: Diseñar el modelo de propagación Okumura-Hata para las redes 5G.....	94
4.4	FASE IV: Factibilidad económico, social y ambiental.....	102
4.4.1	Factibilidad Económica.....	102
4.4.2	Factibilidad Operacional.....	102
4.4.3	Factibilidad Técnica	103
4.4.4	Factibilidad Legal.....	105
4.4.5	Factibilidad Medioambiental.....	105
4.4.6	Factibilidad Social.....	106
	CONCLUSION	108
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

INDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	Pág
Figura 1. Interpretación física del modelo de Allsebrook-Parsons (izquierda) y del modelo de Ikegami-Loshida.....	26
Figura 2. Zonas de Fresnel	44
Figura 3. Retícula de planificación.....	50
Figura 4. Clúster de 7 células.....	52
Figura 5. Comparación de campo antenas 4G y antenas 5G m-MIMO direccional.....	55
Figura 6. Antena del sector 5G con tecnología mimo 4x4, 4 puertos para la mimosa A5C.....	56
Figura 7. Antena de plato 4.9-6.5GHz con 60cm de diámetro MIMO Ubiquiti RocketM5, PTP RocketDish, mimosa C5X.....	57
Figura 8. Antena del sector 5G con tecnología mimo 4x4, 4 puertos para la mimosa A5C.....	59
Figura 9. Antena de plato al aire libre 1.7-3.8GHz LTE/5G 4G/LTE, con movimiento e inclinación ($\pm 45^\circ$).....	60
Figura 10. Evolución de las redes móviles.....	64
Figura 11. Nuevas bandas de espectro objeto de estudio de cara a la CMR-19.....	68
Figura 12. El enfoque espectral multicapa de Huawei.....	70
Figura 13. Espectro en américa latina y el caribe para 5G: bandas medias y altas.....	71
Figura 14. Opciones de canalización de la banda 2,5 GHz.....	79
Figura 15. Banda de 2.300 MHz en América Latina.....	81
Figura 16. Banda de 3.500 MHz en América Latina.....	84
Figura 17. Bandas de frecuencia para las redes 5G.....	88
Figura 18. Comparación de velocidades según la frecuencia empleada.....	91
Figura 19. Municipio San Diego del estado Carabobo.....	95
Figura 20. Ubicación de las radios bases de Digitel más cercanas a la UJAP.....	99
Figura 21. Ubicación 3D de la radio base SANDIEGO1.....	100

INDICE DE GRAFICAS

CONTENIDO	Pág
Gráfico 1. Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles.....	18
Gráfico 2. Evolución del número de líneas de telefonía móvil en España en el periodo de 2000 a 2013 (millones de líneas).....	19
Gráfico 3. Desarrollos TIC globales.....	20
Gráfico 4. Tráfico Mensual Total de Voz y Datos Móviles.....	21
Gráfico 5. Tráfico Mensual Total de Voz y Datos Móviles.....	22
Gráfico 6. Evolución de las tasas de datos alámbricos e inalámbricos.....	23
Gráfico 7. Tabla usada por Okumura para hacer predicciones	47
Gráfico 8. Perfil de terreno con los parámetros de Okumura-Hata.....	48
Gráfico 9. Ejemplo de puntos de medición de los obstáculos a lo largo de una ruta radial desde el transmisor de referencia.....	62
Gráfico 10. Cronograma y proceso detallados para las IMT-2020.....	66
Gráfico 11. Distribución de los principales servicios que esperan de 5G, según el ancho de banda y la latencia (tiempo de respuesta) esperada.....	68
Gráfico 12. División Global para la Atribución de Frecuencias.....	71
Gráfico 13. Cobertura potencial por tipo de banda.....	92
Gráfico 14. Esquema de funcionamiento de la tecnología Small Cells para 5G.....	104



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

**ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE RADIO FRECUENCIA EN REDES
5G UTILIZANDO EL MODELO OKUMURA-HATA.**

Autores: Diaz Marcano, Rossana Maricruz

Tutor: Ing. Pablo Barrios

Fecha:

RESUMEN

El presente trabajo de grado plantea dar una visión global sobre los el modelo de propagación para las comunicaciones móviles 5G y sobre los diversos propuestos para la futura generación 5G. Con este propósito, se analizó la evolución de las comunicaciones móviles y de los modelos de propagación a lo largo de la historia hasta llegar a la actualidad, y se estableció una clasificación de los distintos modelos atendiendo a tres características propias de los mismos. Una vez clasificados los modelos de predicción, se estableció en disposición de como pudieran ser aplicados a los estándares que se utilizan en la actualidad como LTE (Long Term Evolution) y LTE-Advanced, que pertenecen a la cuarta generación de tecnologías móviles o 4G y posteriormente se emplearon resultados que existen de proyectos que al día de hoy se encuentran en fase de investigación de la nueva generación 5G, para definir algunos aspectos que deberá cubrir el nuevo modelo de canal, así como los modelos de propagación más adecuados para trabajar con los nuevos requisitos. Para llevar a cabo esta tarea en las comunicaciones 5G me apoye de estudios comparativos, simulaciones y ejemplos en escenarios reales.

Descriptores: 5G, Propagación, Comunicaciones.

INTRODUCCIÓN

Al día de hoy existen numerosos proyectos de investigación cuyo objetivo consiste en dar solución a los requisitos planteados por la nueva generación de comunicaciones móviles, así como el desarrollo de mejoras para la actual. En este trabajo se analizó el tema de los modelos de propagación para comunicaciones móviles, enfocado en la quinta generación la cual se está implementando en la actualidad. Apoyado en los resultados de estos estudios, sumado con comparaciones y ejemplos, se intentó dar una visión global de los modelos de predicción de pérdidas utilizados hoy en día y se trató de analizar las características que deberán tener en el futuro.

Actualmente la demanda de mejores servicios y nuevas funcionalidades en las redes es la que domina el mercado de las comunicaciones móviles, lo que hace que las empresas de este sector se encuentren en una lucha permanente por innovar las tecnologías disponibles. En el caso de la evolución de los modelos de propagación podríamos decir que va de la mano con el desarrollo de las comunicaciones móviles, ya que se hacen necesarios nuevos modelos de predicción por cada nuevo modelo de canal surgido de los requisitos de una nueva generación, la incorporación de nuevos escenarios, entre otros.

En toda planificación de sistema de comunicaciones móviles es necesario emplear previamente modelos de propagación que permitan determinar la atenuación que sufrirá la señal en el entorno requerido. Cuanto más precisos sean los resultados que arrojen los cálculos de predicción de pérdidas menor será el error que cometamos a la hora de realizar las simulaciones para después instalar el sistema. Por lo tanto, la elección del modelo de propagación que se empleó, se convierte en un punto crítico de la planificación, ya que de ella puede depender el éxito de nuestra tarea.

Dada la importancia de este tema, el objetivo del trabajo fue el de analizar el modelo de propagación que se empleó al día de hoy en las redes para la nueva generación 5G.

En primer lugar, se trató de establecer una definición propia del modelo de propagación que se ajuste a las necesidades, para después adentrarse tanto las comunicaciones móviles como los modelos de propagación.

La propuesta de modelos de propagación para comunicaciones móviles para redes 5G utilizando el modelo Okumura-Hata, se realizó bajo una pequeña introducción al 5G en la que se presentan los requisitos que deberá cubrir esta nueva generación y en la cual seguidamente se muestran las bandas de frecuencia en las que se pretende trabajar, así como los modelos de canal y de predicción de pérdidas en 5G.

Este proyecto se presentará estructurado con cuatro capítulos de la manera siguiente:

Capítulo 1 El Problema: en este primer capítulo se describió el problema existente, el objetivo principal del proyecto: “Estudio de Propagación de móviles para redes 5G utilizando el modelo Okumura-Hata.”, los pasos para lograrlo, es decir los objetivos específicos y la razón por la que este debe llevarse a cabo. De igual forma se dio a conocer de manera explícita el alcance y limitantes que tendrá el proyecto.

Capítulo II Marco Teórico: se estableció las teorías que sustentan la realización del proyecto al igual que los antecedentes existentes que puedan aportar algo al mismo.

Capítulo III Marco Metodológico: capítulo en el cual se dio a conocer la metodología que se empleó para el desarrollo de este trabajo y se especificaron los métodos utilizados para recolectar y analizar la información necesaria.

Capítulo IV Resultados: se mostró las derivaciones del estudio que se obtuvieron aplicando el estudio y la metodología seleccionada.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

El origen de la telefonía celular o móvil como hoy se conoce, remonta, a la década de los años cuarenta. Comparado con el frenético ritmo actual de desarrollo, parece extraño que haya sido necesario un extenso lapso de tiempo para lograr el estado actual. En tal sentido existen algunas razones importantes para ello, como por ejemplo la falta de tecnología, el desinterés e incluso las regulaciones legales actuales.

De la misma manera que los tubos o lámparas de vacío y los transistores basados en semiconductores hicieron posible las primeras redes de telefonía fija, la revolución de la radio celular no pudo llegar hasta que los microprocesadores de bajo coste, las memorias y las técnicas de conmutación digital estuvieron disponibles.

Así mismo la telefonía móvil como una secuencia de la telefonía fija, brindó a los usuarios eliminando las fronteras y ha logrado la apertura a nuevos espacios (hogares y trabajo), permitiendo la comunicación en cualquier momento sin importar su ubicación geográfica. La utilización de dispositivos (teléfonos móviles y estaciones base) que usan ondas de radio para transmitir y recibir, esta ha evolucionado más allá de la fija, debido a el avance de la telefonía móvil se pueden enviar y recibir mensajes, acceder a internet, mensajes multimedia, entre otras, funciona con ondas de radio, iguales a las empleadas para escuchar las emisoras de radio de FM, AM además de la televisión; teniendo como diferencia la frecuencia y forma en que se manejan o procesan esas ondas, por ende el desarrollo de los sistemas de radiocomunicaciones móviles han requerido técnicas sofisticadas, imposibles de realizar de no haber sido por la evolución de la electrónica, especialmente los circuitos integrados semiconductores de muy alta escala de integración, como microprocesadores y memorias.

En la actualidad una red celular se encuentra formada por celdas de radio que son divisiones del área de servicio en pequeñas áreas geográficas, cada una de estas celdas es servida por una estación base, dotada de equipos de transmisión de baja potencia y recepción de radio en varias frecuencias o canales (en un subconjunto del total de frecuencias asignadas al sistema), Las mismas frecuencias o canales de una celda se pueden utilizar en otra que esté a suficiente distancia de la primera.

Sin embargo, las celdas colindantes usan siempre distinto conjunto de canales o frecuencias para evitar las interferencias. De esta manera se consigue una utilización eficiente de las frecuencias disponibles, permitiendo la cobertura de países enteros y un aumento de la capacidad del sistema. Todo el manejo de las llamadas y de las frecuencias es gestionado por unas centrales telefónicas especiales para servicios móviles, a las que se encuentran unidas las estaciones base.

De igual manera, los sistemas de 1G (generación), presentan problemas importantes en lo concerniente a la privacidad de las comunicaciones, Además, la seguridad en cuanto a la posibilidad de fraude era más bien escasa, es posible, con cierta facilidad, crear teléfonos clónicos que de cara a la red son indistinguibles de los teléfonos de los usuarios legales, por lo que su uso fraudulento de las suscripciones legales era posible, con la consiguiente pérdida económica por parte de los operadores del servicio. En los sistemas de 2G se incorporaban medidas de seguridad que obviaban los dos inconvenientes anteriores señalados.

Debe señalarse que el GSM es un estándar de telefonía móvil digital multibanda, es decir, definido para diferentes bandas de frecuencia, La primera de ellas es una banda de 900 MHz, ampliándose posteriormente a 1.800 MHz y a 1.900 MHz. En la actualidad existen también versiones del estándar en las bandas de 850 MHz y 450 MHz. Como en los sistemas de 1G, se emplea un canal para transmisión del móvil a la estación base y otro para la transmisión de la estación base al móvil, es decir, se usan dos frecuencias o canales diferentes para cada comunicación, conocida como canal dúplex.

Los sistemas celulares de 2G, además de prestar los servicios de voz, servicios específicos de transmisión de datos, de fax y de mensajería (SMS). Estos mismos terminales además de funcionar como teléfonos también permiten operar como módems de datos y, en conexión con un PC, como un fax. El hecho de que el sistema sea digital permite una integración homogénea de todos estos servicios.

En los sistemas de telefonía móvil digital como el GSM ocurre algo semejante, a voz captada por el micrófono del móvil se convierte en una señal eléctrica que posteriormente se convierte en una secuencia aleatoria de ceros y unos (llamados bits), en función de las variaciones de la voz. Además, se añaden algunos otros ceros y unos más para mejorar la eficacia de la transmisión. Pero en el GSM también tiene señales de alta frecuencia y hay que hacerles algo para que transmitan información. Pero a cada cero, o cada uno, se varía la frecuencia de la señal de alta frecuencia un poquito hacia arriba o hacia abajo (semejante a la FM).

Es decir, en la recepción en el otro extremo las pequeñas variaciones de frecuencia hacia arriba y hacia abajo son interpretadas como los ceros y unos que se habían transmitido también a través de una antena. Una vez eliminados los bits extra añadidos, se tienen los originales y, de manera análoga a como ocurre en un reproductor de CD, se recupera la señal original de voz que puede ser ya escuchada en un auricular. Dicho así parece muy sencillo, pero en realidad se trata de tareas muy complejas realizadas por potentes miniordenadores incorporados en los teléfonos móviles y en el resto del sistema.

Las ondas de radio son ondas electromagnéticas que poseen una componente eléctrica y una componente magnética y como tales, están expuestas a ciertos fenómenos los cuales son capaces de modificar el patrón de propagación de la onda.

En condiciones especiales y con una atmosfera uniforme, las ondas de radio tienen a desplazarse en línea recta, esto quiere decir que siempre que haya una línea de vista entre el emisor y el receptor, este tipo de comunicación será bastante eficiente, pero si se requiere de una comunicación de un punto a otro, el cual se encuentra más allá del

horizonte, tendremos que tomar en cuenta las distintas condiciones de propagación y las adecuadas frecuencias para su correcta comunicación.

Para realizar comunicaciones seguras entre dos puntos lejanos y sin salir de la atmosfera, se utilizan frecuencias denominadas altas frecuencias (High frequency) ó HF que van de 3 Mhz a los 30 Mhz, ya que estas frecuencias son reflejadas en la atmosfera y regresan a la tierra a grandes distancias. Las frecuencias en orden de VHF, UHF y SHF no se reflejan en la atmosfera salvo en ciertas circunstancias, es por esto que solo son útiles en comunicaciones de punto a punto y satelitales.

No se podría hablar de comunicaciones por medio de ondas de radio a grandes distancias si no se toman ciertos fenómenos en cuenta como lo son la refracción, la reflexión, la dispersión y la difracción los cuales hacen posible la comunicación entre dos puntos más allá del horizonte.

Es por ello que para la nueva generación 5G existen una serie de necesidades como lo son mejorar el rendimiento del sistema, disminuir la latencia, aumentar la seguridad y la conectividad, así como la cobertura. La arquitectura de 5G deberá incluir funciones de red modulares que puedan ser escaladas por demanda, para adaptar varios casos de uso de manera ágil y eficiente. También se espera que en 5G se opere en un entorno heterogéneo caracterizado por la existencia de múltiples tecnologías de acceso, redes multicapa, diferentes tipos de dispositivos, entre otros.

Gracias al transporte de grandes volúmenes de datos a velocidades mucho más altas, a la conexión fiable de un enorme número de dispositivos y al procesamiento de ingentes volúmenes de datos con un retardo mínimo, cabe esperar que la 5G conecte personas, cosas, datos, aplicaciones, sistemas de transporte y ciudades en entornos de comunicación de redes inteligentes.

Se prevé que la 5G dé soporte a aplicaciones tales como edificios y hogares inteligentes, ciudades inteligentes, vídeo 3D, trabajo y juegos en la nube, cirugía a distancia, realidad virtual y aumentada, y comunicaciones masivas entre máquina a

máquina para la industria de la automoción y los vehículos sin conductor. En la actualidad, las redes 3G y 4G presentan dificultades a la hora de ofrecer estos servicios.

Debido a su gran escala y alcance, se espera que la 5G acelere el cumplimiento de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Borrero, A (2018) se refirió, a como las ODS, reconocen un papel catalizador fundamental para el desarrollo de las comunicaciones y de las tecnologías de la información, así como la interconexión mundial, éstas ofrecen un gran potencial para acelerar el progreso humano, reducir la brecha digital y desarrollar sociedades del conocimiento.

En toda planificación de sistema de comunicaciones móviles es necesario emplear previamente modelos de propagación ya que el mismo permite determinar la atenuación que sufrirá la señal en el entorno requerido. En este sentido en cuanto más precisos son los resultados que arrojen los cálculos de predicción de pérdidas menor será el error que se comete a la hora en que se realizan simulaciones para después instalar el sistema.

Por lo tanto, la elección del modelo de propagación utilizado se convierte en un punto crítico de la planificación ya que sin el mismo se presenta la ausencia de la determinación de la pérdida básica de propagación o de la intensidad de campo, el análisis de la propagación multitrayecto y dispersiones temporal y frecuencial, el desarrollo de modelos de simulación de canal (modulación y protección), realización de medidas reales para comprobar los resultados.

En tal sentido, los modelos para la propagación de ciudades se pueden clasificar en 3 categorías:

- **Empíricos:** Okumura, Hata, etc Semi-empirico BBC y Walfish Ikegami.
- **Determinísticos:** trazado de rayos.
- **Otra forma de clasificar es por el tipo de área:** rural y suburbano Urbano.

1.2 Formulación del problema

Frente a esta situación se planteó la siguiente interrogante:

En consecuencia, ¿Cómo aplicar el modelo de Okumura-Hata en estudios de propagación de radio frecuencia en redes celulares 5G?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivos generales

Proponer el uso del modelo de propagación de radio frecuencia en redes 5G utilizando el modelo Okumura-Hata.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar el alcance del modelo de propagación de Okumura-Hata.
- Identificar las frecuencias usadas en 5G
- Diseñar el modelo de propagación Okumura-Hata para las redes 5G.
- Factibilidad económico, social y ambiental.

1.4 Justificación de la investigación

La telefonía móvil digital presenta mayor protección contra las interferencias en comparación a los sistemas analógico, lo que conlleva a una mejor calidad del servicio y mayor capacidad. La evolución de la microelectrónica permitió la reducción de tamaño de los móviles, un abaratamiento de los mismos y también uso más eficiente de la carga de las baterías.

En consecuencia, con todos los avances tecnológicos, nace la telefonía móvil 5G, siendo esta un tipo de conexión inalámbrica diseñada para mantenerse al día con la proliferación de dispositivos móviles conectados a internet y sus necesidades, la cual no es sólo para el teléfono y el ordenador, productos de domótica, cerraduras, cámaras de seguridad, coches, entre otros. 5G es una sigla que significa “la quinta generación” de tecnologías de telefonía móvil.

La tecnología inalámbrica para teléfonos técnicamente comenzó con el 1G y, al comienzo de los años 90, se expandió al 2G cuando las compañías comenzaron a habilitar que la gente enviase SMS entre dos dispositivos, el mundo conocería el 3G, que dio a las personas las capacidades de realizar llamadas, enviar mensajes de texto y navegar por internet. El 4G mejoró muchas de esas posibilidades que habilitó el 3G, pero a más velocidad.

Las compañías añadieron entonces el LTE (Long Term Evolution, evolución a largo plazo en español) a la tecnología 4G. El LTE se convirtió en la modalidad de 4G más consistente y más rápida, compitiendo contra otras tecnologías como WiMax. El 5G estará construido sobre los cimientos que el 4G LTE que está creado. Va a permitir enviar textos, realizar llamadas y navegar por internet como de costumbre, además de aumentar radicalmente la velocidad de transferencia. El 5G hará más sencillo que la gente descargue y suba contenido en Ultra HD y vídeo en 3D.

Por tal motivo en esta investigación se empleó el Modelo Okumura, siendo este uno de los más utilizados para la predicción de la pérdida de propagación en áreas urbanas, que proporcionan el nivel de atenuación media relativa al espacio libre, en función de la frecuencia, la distancia entre transmisor y receptor, la altura de las antenas de la estación base y la estación móvil, además de varios factores de corrección específicos para diferentes tipos de trayecto.

Este modelo es aplicable para el rango de frecuencias entre 150 a 1920 MHz es decir comprende la banda de VHF y UHF, la distancia máxima de separación que puede existir entre el transmisor y el receptor es de hasta 100 km. Puede ser usado para alturas de la antena de la estación base en el rango de 30 m a 1000 m. Se uso para verificar y predecir la potencia en un receptor ubicado en un área urbana para comunicaciones móviles de 5G.

1.5 Alcance de la Investigación

Con el alcance del presente trabajo de grado se planteó brindar una propuesta basada en el modelo Okumura-Hata para la propagación de las comunicaciones móviles 5G, atendiendo las características propias del mismo para su evolución.

Una vez estudiada la aplicación y evolución de las comunicaciones móviles y los modelos de propagación actuales en las redes LTE (Long Term Evolution), así como la cuarta generación de tecnologías móviles también conocida como 4G a nivel nacional, me apoye en los múltiples resultados que se han obtenido de estos sumados a los proyectos que al día de hoy se encuentran en fase de investigación de la nueva generación 5G, para definir de esta forma algunos aspectos que deberá cubrir el nuevo modelo de canal, así como su modelo de propagación para trabajar con estos nuevos requisitos, valiéndome de estudios comparativos y ejemplos en escenarios reales.

Por consiguiente, la investigación permitio observar la caracterización de la propagación mediante el modelo Okumura-Hata, así como la distancia, la frecuencia y otras condiciones del medio basados en modelos matemáticos como parámetro de cálculo y con ello lograr predecir las pérdidas en el camino del enlace radio, o bien la distancia de cobertura de los transmisores.

Para el desarrollo del mismo se tomaron algunos antecedentes basados en las redes 4G/5G y toda la información referente al modelo de propagación Okumura-Hata.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

Para el desarrollo de este proyecto se procedió a la búsqueda de investigaciones previas que traten el tema en estudio, se han seleccionado como puntos referenciales y de consulta para la presente investigación, una serie de trabajos que enmarcan temas inherentes al modelo de propagación de móviles para redes 5G utilizando el modelo Okumura-Hata. Estos proyectos se describen brevemente en orden cronológico a continuación:

En primer lugar, Luque, D. y Tatasciore, A. (2019) en su trabajo titulado, **“Aplicación de modelo Okumura-Hata en propagación radio móvil de redes 4g mediante simulación”**, como requerimiento para la obtención del Título de ingeniero en Telecomunicaciones en la Universidad José Antonio Páez San Diego Venezuela, la cual se basa en 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.

De este trabajo se desprende un apoyo al realizar un estudio de cobertura y como aplicar los parámetros necesarios a la red 5G.

De la misma manera, Mohamed, I. (2018) efectuó una investigación titulada, **“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. De este trabajo se obtuvo las conclusiones referentes a el análisis de estimación de pérdida de trayectoria mediante el modelo Okumura-Hata.

Así mismo, García, R. (2016) en su trabajo de investigación 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. En tal sentido brindo aporte significativo a la realización de este trabajo brindando la 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.

Seguidamente, Quintana, R. (2013) realizó una investigación para su trabajo de pregrado en la Universidad Central de Las Villas titulada “**Estudio comparativo de los modelos de propagación de canal inalámbrico**” con el fin de optar al título de Ingeniero Electrónico. En este trabajo el autor se planteó describir los modelos de propagación del canal inalámbrico resultan de gran importancia en el diseño de redes y sistemas, necesarios para determinar los modelos más eficaces en cada entorno. De este trabajo se desprende una selección de modelos de propagación en ambientes urbanos y suburbanos y se determina el impacto de la altura de la estación base sobre las predicciones de los modelos, destacándose la sensibilidad de aquellos que incluyen información detallada del entorno en su formulación.

2.2 Bases Teóricas

Las bases teóricas son el sustento de la investigación, comprendiendo un conjunto de conceptos y proporciones, que constituyen un punto de vista o enfoque determinado

y que de esta manera se observa una visión más amplia sobre la investigación y esto sirve como punto de partida de la misma. A tal efecto, se consideró oportuno profundizar algunas teorías en función de los tópicos que integran el desarrollo de esta investigación.

2.2.1 Evolución de las generaciones móviles

Fue a principios del siglo XX, cuando Marconi desarrolló su sistema de telegrafía sin hilos con el propósito de establecer comunicación entre los barcos y el puerto y entre ellos mismos, y de esta manera evitar colisiones.

Éste puede ser considerado como el primer sistema de comunicaciones móviles, en tanto que bien el emisor o bien el receptor podían estar en movimiento debido a la ausencia de cables en la transmisión. A partir de aquí comenzaron a evolucionar este tipo de comunicaciones, así como el concepto de estructura celular que es el empleado hoy en día por los sistemas celulares, y que no debemos perder de vista puesto que son el objeto de nuestro estudio.

Las primeras aproximaciones a lo que hoy en día se conoce como sistema celular, tuvieron lugar en torno a 1950 y ya incluían conceptos como la división del área en pequeñas celdas para permitir la reutilización de frecuencias. El problema era que para el correcto funcionamiento de este modelo se precisaba que los teléfonos móviles utilizaran frecuencias altas, por lo que no fue posible hasta unas décadas más tarde, cuando la tecnología lo permitió, implementar estos sistemas.

2.2.1.1 Generación cero

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

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 (American Mobile Phone System) que más tarde se convertiría en el sistema TACS (Total Access Communication System) en Europa. Sin embargo, el primer sistema de telefonía móvil tal y como se conocen ahora, fue el NMT (Nordisk MobilTelefoni) 450 lanzado por Ericsson en 1981 en los países nórdicos, y su posterior evolución, el sistema NMT 900 en 1986. Todos estos sistemas, de tecnología analógica, son los conocidos hoy en día como de primera generación.

2.2.1.3 Segunda generación

La digitalización de este tipo de sistemas de comunicación dio lugar a la segunda generación de móviles. En Estados Unidos la evolución del sistema AMPS culminó en la tecnología IS-54 o Digital AMPS, que más tarde se convertiría en el IS-136 con la introducción de mejoras.

Paralelamente se fue desarrollando el estándar IS-95 que empleaba las técnicas de acceso múltiple por división de código (CDMA). 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. Surgió así el estándar GSM, desarrollado por el ETSI (European Telecommunications Standar Institute) y que más tarde ha sido el universalizado en telefonía móvil debido al buen servicio proporcionado en las llamadas de voz y una arquitectura de red eficiente, entre otros factores.

Sin embargo, con el paso de los años surgió la necesidad de incorporar servicios multimedia que precisaban de un aumento de la capacidad de transmisión de datos del sistema. Esto tuvo como consecuencia el comienzo del desarrollo de una nueva generación (3G) que permitiese la incorporación de estos servicios.

Como ocurre en todos los cambios de tecnologías de distintas generaciones, hasta que la nueva no alcanza un grado de madurez suficiente que se posibilita un servicio de calidad aceptable, se realizan mejoras en la existente que permitan aumentar sus prestaciones. De esta manera surgen las denominadas generaciones intermedias o de transición, que en el caso de la segunda fueron la 2.5 (GPRS) y la 2.75 (EDGE). También es necesario comentar que el hecho del surgimiento de nuevas tecnologías no implica que se dejen de utilizar las predecesoras, es más, estas conviven durante un periodo de años que depende de hasta cuando mantenga el servicio cada país.

2.2.1.4 Tercera generación

La tercera generación surgió para integrar servicios multimedia como la navegación por Internet, la televisión, la videoconferencia, entre otros.

Además, en un principio se estudió la idea de un sistema global que proporcionase cobertura e itinerancia por todo el mundo. Esta propuesta aparece recogida por la ITU (International Telecommunication Union) como IMT-2000 (International Mobile Telecommunications), pero por intereses de tipo económico y estratégico nunca llegó a ponerse en práctica. No obstante, surgieron nuevos estándares como el sistema CDMA 2000 en EE.UU. y el sistema UMTS en Europa que son considerados de la tercera generación, aunque no son compatibles entre ellos. En el año 2000 empezaron a repartirse las licencias a los operadores de Europa para emplear este tipo de tecnologías,

aunque no fue hasta unos años más tarde cuando empezaron a comercializarse sus servicios.

Al igual que ocurrió con las generaciones precedentes, entre la tercera generación de móviles y la cuarta, 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 3.9 G). El caso más curioso es el de la tecnología LTE puesto que hay quién la considera como una evolución del sistema UMTS y HSPA, y por lo tanto debería englobarse como generación 3.9, mientras que otros basándose en la evolución de su arquitectura ya la incluyen dentro de la cuarta generación, pese a no cumplir los estándares. En España, por ejemplo, las operadoras ofertaron LTE a sus consumidores como 4G, esto fue posible debido a que el IMT Advanced, nuevo comité encargado de definir las especificaciones de 4G, permitió que así fuese.

En cambio, su posterior release LTE Advanced es la que verdaderamente cumple con los estándares, y por eso esta tecnología ya se ofrece por algunas operadoras como 4G+.

2.2.1.5 Cuarta generación

En 2008 la ITU 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 como tecnologías 4G, hay dos sistemas candidatos que esperan cumplir todos ellos e incluso superarlos, éstos son LTE Advanced y WiMAX versión 2.

En España las grandes operadoras han optado por la tecnología LTE Advanced y actualmente se encuentra en fase de implementación en las grandes ciudades, y en algunas de ellas ya es posible conectarse a este tipo de redes. En cuanto a WiMAX, es una alternativa que actualmente se emplea en entornos de difícil acceso con un menor número de usuarios.

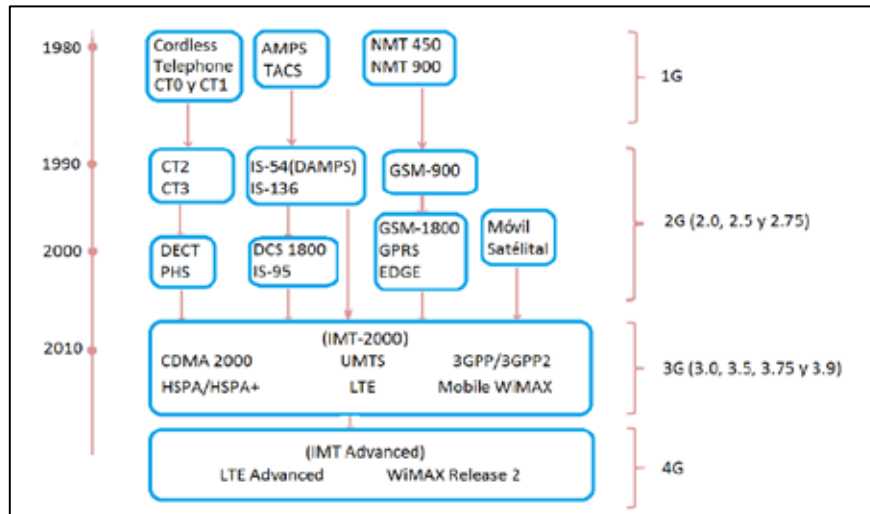


Gráfico 1. Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles
Fuente: 5G Américas (2019)

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.

2.2.1.6 Quinta generación

En cuanto a la futura generación 5G, en la actualidad hay distintos proyectos por todo el mundo (en Europa uno de los principales proyectos se denomina METIS: Mobile and wireless communications Enablers for Twenty-

twenty Information Society) cuyo objetivo es el estudio de las tecnologías y especificaciones para esta nueva generación, que se espera que esté en funcionamiento en este año 2020.

Las características de este nuevo estándar serán la conectividad total entre dispositivos, el acceso a la información y los servicios en cualquier parte, y una gran calidad de servicio acompañada de un enorme volumen de tráfico.

2.2.2 Evolución de las comunicaciones móviles

La definición que describe la base del trabajo se sitúa en el contexto histórico de estos modelos matemáticos, así como de su enorme evolución en los últimos años propiciada por el auge experimentado por las comunicaciones móviles.

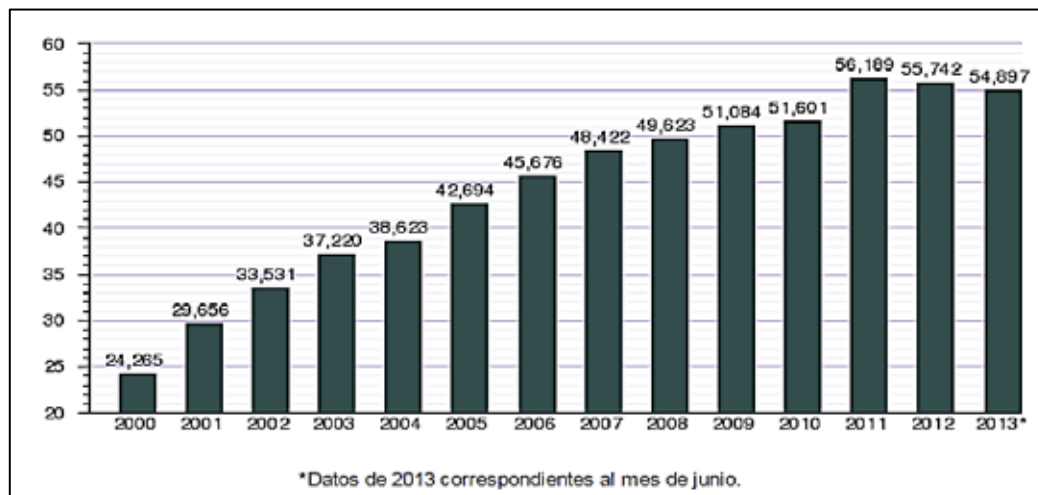


Gráfico 2. Evolución del número de líneas de telefonía móvil en España en el periodo de 2000 a 2013 (millones de líneas)

Fuente: Observatorio Red.es (2019)

A la hora de realizar un análisis de los modelos según han ido surgiendo en el tiempo, hay que tener en cuenta que éstos se han desarrollado paralelamente a las comunicaciones móviles, y a la necesidad de planificar los radioenlaces en distintos medios y con las características propias de cada generación de móviles.

Así pues, lo que haremos será resumir brevemente la historia de las comunicaciones móviles para, a continuación, indicar los modelos de propagación que se han utilizado y se utilizan en cada generación.

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 el gráfico 3, que analiza la evolución de las suscripciones móviles a lo largo de los últimos años.

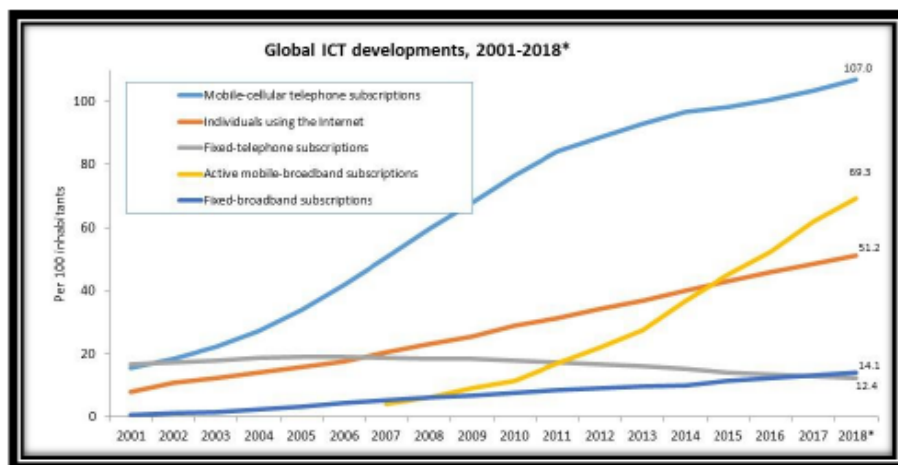


Gráfico 3. Desarrollos TIC globales
Fuente: ITU World Telecomunicaciones/ICT Indicators database (2018)

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 el gráfico 4 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 gráfico 4 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.

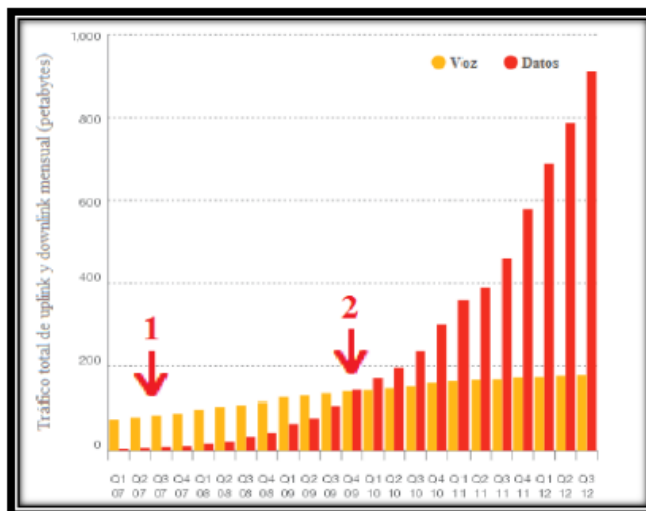


Gráfico 4. Tráfico Mensual Total de Voz y Datos Móviles
Fuente: Ericsson's Mobility Report for November (2012)

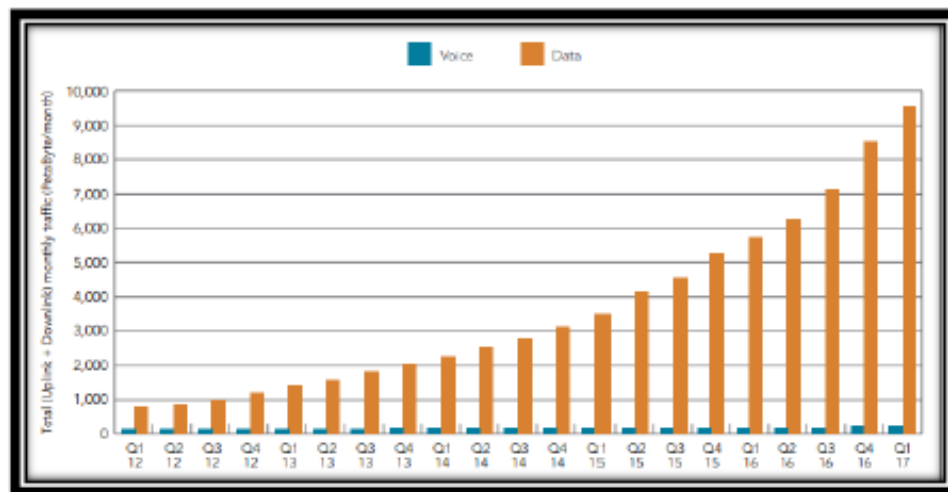


Gráfico 5. Tráfico Mensual Total de Voz y Datos Móviles
Fuente: Akamai's [state of the internet] (2017)

El tráfico de datos móviles ha seguido creciendo, y la grafico 5 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 el gráfico 5. 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

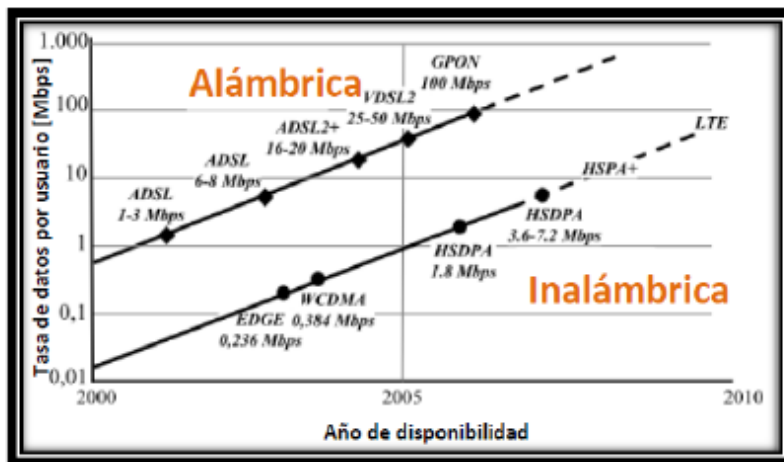


Gráfico 6. Evolución de las tasas de datos alámbricas e inalámbricas
Fuente: LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access (2018)

2.2.3 Modelo de propagación

En primer lugar, formulamos una definición de los modelos de propagación, que describa correctamente su finalidad y sea lo más completa posible. En tal sentido, un

modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radio de un ambiente dado.

Generalmente los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos o una combinación de estos dos (semi - empíricos). Mientras que los modelos empíricos se basan en mediciones, los modelos teóricos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio.

Los modelos de propagación predicen la pérdida por trayectoria que una señal de RF pueda tener entre una estación base y un receptor sea móvil o fijo. La ventaja de modelar radio canales teniendo en cuenta las características de la trayectoria entre Transmisor (Tx) y Receptor (Rx), es conocer la viabilidad de los proyectos que se deseen planear en determinados sectores, de esta manera se podrá hacer una estimación acerca de la necesidad, costos y capacidad de los equipos requeridos (especificaciones técnicas).

El desempeño de los modelos de propagación se mide por la veracidad de los resultados en comparación con medidas de campo reales. Los modelos descritos en este artículo tienen una buena correlación en cuanto a las comparaciones mencionadas tanto a nivel de simulación como en mediciones de campo.

La aplicabilidad de un modelo depende de las especificaciones que este mismo requiera tal como son: el tipo de terreno (montañoso, ondulado o cuasi liso), las características del ambiente de propagación (área urbana, suburbana, abierta), características de la atmósfera (índice de refracción, intensidad de las lluvias), propiedades eléctricas del suelo (conductividad terrestre), tipo del material de las construcciones urbanas entre otros.

Una vez se divide el espacio en células mediante el dimensionamiento anterior, se realizan los cálculos de la cobertura a lo largo de varios radiales equiespaciados en torno a la estación base. Se trata de un proceso tedioso y que requería de la aplicación de los distintos modelos de propagación de manera repetida por cada radial, por lo que

se informatizaron los cálculos. Al igual que se explicó anteriormente, se va a diferenciar los modelos para entornos urbanos y rurales.

En medios urbanos los modelos de propagación calculan la pérdida básica de propagación según la fórmula (1):

$$l_b(d) = K \cdot d$$

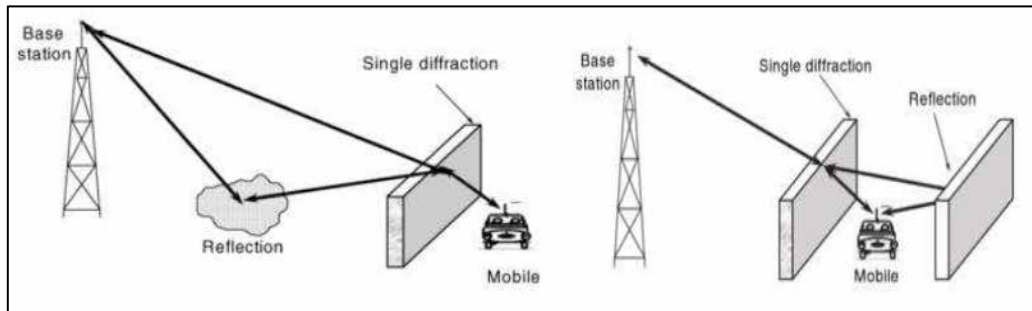


Figura 1. Interpretación física del modelo de Allsebrook-Parsons (izquierda) y del modelo de Ikegami-Loshida
Fuente. ITU (2018)

2.2.3.1 Características de los modelos de propagación

En la actualidad existen numerosos modelos de propagación, para la correcta implementación del sistema se requiere revisar un modelo que interprete la mayor cantidad de variables posibles, y así poder configurarlo lo más posible a la situación real. El modelo seleccionado, está dentro de uno de los más usados en la predicción de alcances máximos en redes móviles para ambientes urbanos y frecuencias mayores a los 2000 MHz, conocido como modelo Okumura-Hata en donde Massaharu Hata alteró el modelo de Okumura para ambientes urbanos, convirtiéndolo en modelo válido para frecuencias de hasta 1500 MHz, por lo cual será utilizado en este estudio.

2.2.3.2 Clasificación de los modelos de propagación

Llegados a este punto y se estableció una clasificación de estos modelos matemáticos diferenciándolos según tres aspectos fundamentales de los mismos.

Dentro de cada grupo estudiamos las características que lo definen y, en función de éstas, los modelos que mejor se ajusten en cada caso proponiendo algunos como ejemplos. En la actualidad hay multitud de modelos, y como en tantos otros casos no hay una única manera de clasificarlos, por lo que nuestra clasificación atenderá a tres características distintas:

a) **Ambiente de propagación:** dependiendo del entorno en el que vayamos a realizar los cálculos, nos convendrá emplear un modelo u otro. Esta

manera de clasificar los modelos fue la que se centró en escoger el modelo que más nos convenga según el ambiente de propagación. Diferenciaremos dos grandes grupos, la propagación en exteriores y la propagación en interiores.

Como la primera aglutina una mayor cantidad de ambientes que la segunda, estudiaremos los casos más generales de ella. Por cada medio referido realizaremos un estudio de cada caso y veremos algunas simulaciones y ejemplos de ellos.

b) Área de cobertura: la segunda clasificación dependió del área de cobertura que se pretendía estudiar. Como hemos visto anteriormente los sistemas celulares actuales dividen su área de cobertura en células, por lo que no será lo mismo realizar los cálculos para una macrocélula de gran extensión que para una picocélula mucho menor, realizaremos una comparación de los distintos métodos para ver cuáles son los que más se ajustan a cada caso.

c) Origen de los datos: esta última clasificación atendió a la manera de obtener los datos de cada modelo. Por lo tanto, diferenciaremos 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 realizarán los cálculos puede establecerse una relación directa con cada tipo de esta clasificación.

Clasificación según el ambiente de propagación

La primera clasificación de las expuestas anteriormente se basó en la agrupación de modelos teniendo en cuenta el ambiente de propagación. Como ya hemos señalado, vamos a dividir esta clasificación en dos grandes escenarios, uno el interior y otro el exterior. Se comenzó definiendo el primero de ellos ya que dentro de sus entornos se presenta un caso más general, mientras que en los

escenarios exteriores varían mucho las consideraciones a tener en cuenta según el caso en el que nos encontremos.

Interiores

Cuando se señalaba a la propagación radioeléctrica en interiores, nos referíamos a la que tiene lugar dentro de los edificios, como por ejemplo centros comerciales, bloques de oficinas, viviendas particulares, estadios, etc. En estos escenarios se tuvo 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 600 MHz, 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 600 MHz (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.

Exteriores

A continuación, vamos a ver el caso de los entornos exteriores, entre los que se encontró una gran variedad de escenarios muy distintos entre ellos. A diferencia de la propagación en interiores donde pese a haber visto distintos ambientes que en un principio pueden parecernos muy diferentes, como por ejemplo un túnel y un edificio de viviendas, a efectos de la propagación de las ondas que tiene 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 o 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. Dividimos las situaciones de este tipo de propagación en tres casos:

- Escenarios por satélite
- Escenarios rurales
- Escenarios urbanos

Las aplicaciones de los modelos de propagación en interiores son múltiples:

- 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.

2.2.4 Modelo de Okumura-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 la predicción de áreas con distancias superiores a los 20 km.

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 consideran la reflexión y el shadowing.

Los cuatro parámetros empleados son:

1. Frecuencia: desde los 150 hasta los 1500 MHz.
2. Distancia entre el transmisor y el receptor: desde 1 hasta 20 km.
3. Altura de la antena del transmisor: 30 a 200 m.
4. Altura de la antena del receptor: 1 a 10 m.

Como 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.

2.2.5 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.

2.3 Definición de términos

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.

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.

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.

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.

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.

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.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

De acuerdo a la situación planteada, la presente investigación entro en modalidad de proyecto especial, según estipula las Normas de elaboración de Trabajo de Grado de la Universidad José Antonio Páez (UJAP, julio 2007), indica que un Proyecto especial de grado:

Consistirá en las creaciones tangibles, susceptibles de ser realizadas a problemas demostrados, o que respondan a necesidades o intereses de tipo cultural. Se incluyen en esta categoría los trabajos de elaboración de libros de texto y de materiales de apoyo educativo, el desarrollo de software y hardware, prototipos y productos tecnológicos en general (p. 5).

En tal sentido, Palella y Martins (2006) nos dice, los proyectos especiales de grado se encuentran destinados a la creación de productos que puedan solucionar deficiencias evidenciadas, se caracterizan por su valor innovador y aporte significativo en cualquier área del conocimiento (p. 107).

Según El Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales de la UPEL (2016), estos trabajos cuentan con objetivos y enfoques metodológicos no previstos en estas normas (UPEL), que por su carácter innovador puedan producir un aporte significativo al conocimiento sobre el tema seleccionado y a la cultura.

Los Proyectos Especiales, en todos los casos, deben incluir la demostración de la necesidad de la creación o de la importancia del aporte, según sea el caso, la fundamentación teórica, la descripción de la metodología utilizada y el resultado concreto del trabajo en forma acabada. En el caso de las Tesis Doctorales sólo se aceptarán Proyectos Especiales cuando tengan como soporte un sólido diseño de investigación, conlleven o se deriven de elaboraciones

conceptuales originales del estudiante y el resultado tangible se caracterice por su significativo valor innovador (p.17).

3.1 Tipo de la Investigación

Es una investigación factible, por tal motivo la UPEL (1998) define el proyecto factible como un estudio “que consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales” (p.7). La propuesta que lo define puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos o procesos, que sólo tienen sentido en el ámbito de sus necesidades. De igual manera, la Universidad Simón Rodríguez (1980) considera que un proyecto factible está orientado a resolver un problema planteado o a satisfacer las necesidades en una institución.

Sin embargo, también es de tipo documental, según Arias (2006), la define como un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, críticas e interpretaciones de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. En tal sentido, se puede realizar a nivel de conocimientos que se adquieren y podrá ser exploratoria, descriptiva o explicativa y se clasifican en:

a) Monográfica:

Consiste en el desarrollo amplio y profundo de un tema específico. Su resultado es un informe comúnmente llamado monografía.

b) Estudios de medición de variables independientes a partir de datos secundarios:

Se fundamenta en la utilización de documentos de cifras o datos numéricos obtenidos y procesados anteriormente por organismos oficiales, archivos, instituciones públicas o privadas, entre otros.

A partir del análisis de estos datos secundarios se pudo elaborar importantes conclusiones relacionadas con el comportamiento o estado actual de variables demográficas, sociales o económicas.

c) Correlacional a partir de datos secundarios:

Se basa en la consulta de documentos de cifras o datos cuantitativos, pero una vez que se identifican los valores de las variables en estudio, se procede a determinar la correlación entre éstas. En este caso el investigador no es quien mide las variables, de allí el carácter secundario de los datos.

3.2 Diseño de la Investigación

El presente trabajo de grado se enmarca dentro de una investigación del tipo documental, según Osorio M. (2011), este tipo de investigación hace énfasis en la recopilación de información teórica que sustentan el estudio para hacer referencia de esos trabajos realizados anteriormente. Este proyecto de investigación se considera dentro de la modalidad de proyecto factible, porque “está basada en la elaboración de una propuesta viable, destinada atender necesidades específicas a partir de un diagnóstico”. En el presente proyecto se ha de elaborar y desarrollar una propuesta para la propagación de móviles para redes 5G utilizando el modelo Okumura-Hata (p.76).

3.3 Nivel de Investigación

El trabajo de grado elaborado presentó características de investigación exploratoria de acuerdo con Arias (2012), afirma que la investigación exploratoria es aquella que se efectúa sobre un tema u objeto desconocido o poco estudiado, por lo que sus resultados constituyen una visión aproximada de dicho objeto, es decir, un nivel superficial de conocimientos. (p. 23).

Según Selltiz, Wrightsman y Cook (1980), los estudios exploratorios pueden ser:

a) Dirigidos a la formulación más precisa de un problema de investigación:

Dado que se carece de información suficiente y de conocimiento previo del objeto de estudio, resulta lógico que la formulación inicial del problema sea imprecisa. En este orden de ideas, la exploración permitirá obtener nuevos datos y elementos que pueden conducir a formular con mayor precisión las preguntas de investigación.

b) Conducentes al planteamiento de una hipótesis: Cuando se desconoce al objeto de estudio resulta difícil formular hipótesis acerca del mismo. La función de la investigación exploratoria es descubrir las bases y recabar información que permita, como resultado del estudio, la formulación de una hipótesis.

Utilidad de la investigación exploratoria:

– Sirve para familiarizar al investigador con un objeto que hasta el momento le era totalmente desconocido (Selltiz y otros, 1980).

– Se utiliza como base para la posterior realización de una investigación descriptiva.

– Puede crear en otros investigadores el interés por el estudio de un nuevo tema o problema.

– Como se expresó anteriormente, puede ayudar a precisar un problema o concluir con la formulación de una hipótesis.

3.4 Técnicas de Recolección de Datos

La recolección de datos se refiere al uso de una gran diversidad de técnicas y herramientas que pueden ser utilizadas por el analista para desarrollar los sistemas de información, la observación. Todos estos instrumentos se aplicaron en un momento en particular, con la finalidad de buscar información que será útil a una investigación.

Según Arias (2006), se entenderá por técnica de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información. (p. 67).

Adicional el mismo autor manifiesta en su libro 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. (p. 68).

En la presente investigación trato con detalle los pasos que se debe seguir en el proceso de recolección de datos, con las técnicas ya antes mencionadas.

Observación

La observación es la acción de observar, de mirar detenidamente, esta técnica es muy útil para el investigador ya que con este instrumento identifica y analizo la

ejecución de un proceso en específico, el objetivo de la observación es muy completo ya que permite al investigador establecer que se está haciendo, como se está ejecutando, quien lo realiza, en que momento y cuánto tiempo se toma, donde se hace y porque se realiza.

La observación tiende a obtener mayor sentido al nivel técnico del procesamiento de datos, donde las tareas se cuantifican más fácilmente. Entre estas tareas encontramos la recopilación, acumulación y transformación de los datos.

Requisitos que debe cumplir la observación:

1. Tener propósitos claros y bien definidos.
2. Precisar el tiempo necesario de la observación.
3. Obtener la autorización por parte de las personas que van a ser observadas para llevar a cabo la observación.
4. Controlar los resultados sistemáticamente o por escrito.

3.4.1 Tipos de documentos o fuentes documentales

Es importante señalar que las fuentes se dividen en tres grandes ramas, en primer lugar, las fuentes impresas periódicas y no periódicas, luego, las fuentes audiovisuales y de sólo audio y por ultimo las fuentes electrónicas.

Fuentes impresas:

Publicaciones no periódicas

- Libros
- Folletos
- Tesis y trabajos de grado
- Trabajo de ascenso
- Informes de investigación

Publicaciones periódicas

- Prensa
- Revistas científicas
- Boletines

Fuentes audio visuales y de sólo audio

Documentos de cifras o datos

- Informes estadísticos
- Informes socioeconómico
- Anuarios
- Memorias y cuentas

Documentos gráficos

- Fotografías
- Reproducciones impresas de obras
- Ilustraciones
- Atlas
- Mapas y planos

Fuentes electrónicas

Documentos de Internet

- Páginas web
- Publicaciones periódicas en línea
- Documentos obtenidos a través del correo electrónico
- Menú gopher
- Grupos de noticias y foros de discusión.

Documentos Digitalizados

- Archivo en disco duro
- Archivo en Cd

Bases de datos

- Institucionales
- Comerciales

3.4.2 Etapas de la investigación documental

- Búsqueda y exploración de fuentes

- Lectura inicial de los documentos
- Elaboración de un esquema Preliminar
- Recolección de datos mediante lecturas
- Análisis e interpretación de la información
- Formulación de un esquema definitivo
- Redacción de la introducción
- Revisión y presentación del informe final

3.5 Fases de la Investigación

FASE I: Diagnosticar el alcance del modelo de propagación de Okumura-Hata: mediante el uso de las herramientas de recolección de datos para el establecimiento de la comunicación de los distintos subsistemas de información.

Actividades que se realizaron:

- a) Aplicar técnicas e instrumentos de recolección de datos
- b) Analizar los resultados

FASE II: Identificar las frecuencias usadas en 5G: Se realizará un estudio de dicha frecuencia para luego poder considerarlos con los resultados obtenidos en la fase anterior para hacer el respectivo análisis y continuar con la fase final.

FASE III: Diseñar el modelo de propagación Okumura-Hata para las redes 5G: finalizadas las fases anteriores. Se planteo la propuesta u estrategia para la problemática encontrada para que conlleve un buen funcionamiento con el modelo Okumura -Hata en las redes 5G, con el cual se han dado grandes avances tecnológicos.

FASE IV: Factibilidad económico, social y ambiental: al culminar todas las fases planteadas se realizó un análisis económico de los costos del proyecto en un esfuerzo por determinar si resulta o no lógico y se evalúa si es posible implementarlo, a su vez se estudió la aceptación y el apoyo de la sociedad civil

y de igual manera se evaluó el impacto ambiental con el fin de preservar los recursos naturales.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se describió con detalles los procesos relacionados a cada fase, en donde se presentaron los resultados obtenidos de las herramientas aplicadas, se anexaron gráficos, figuras y diagramas, que facilitaron la visualización y entendimiento de lo planteado.

4.1 FASE I: Diagnosticar el alcance del modelo de propagación de Okumura-Hata.

Es sabido que al propagarse una señal electromagnética por el ambiente sufre pérdidas, que deben ser establecidas en la fase de diseño mediante el uso de herramientas de recolección de datos para determinar el alcance y nivel de recepción suficiente para mantener un enlace con una calidad de servicio razonable.

Para determinar el alcance del modelo de propagación a emplear, se debe estudiar a fondo la ruta que sigue la señal desde el transmisor hasta el receptor puede ser desde una simple y sencilla línea de vista hasta un ambiente en cual tengamos una gran cantidad de obstáculos como edificios, montañas o árboles que lo interfieran.

En este sentido el alcance, la predicción y el modelado de los canales de radiocomunicación son una de las partes más complicadas que intervienen en el diseño de sistemas de comunicación, por lo general esta parte se hace de manera estadística, tomando como base mediciones realizadas en una zona específica y para un determinado sistema o parte del espectro.

El modelo de Okumura es uno de los más ampliamente utilizados para predicción de señales en áreas urbanas. Este modelo es aplicable para frecuencias en el rango de 150 MHz a los 1920 Mhz, es decir, comprende la banda de VHF y UHF (sin embargo, típicamente es extrapolado para frecuencias arriba de 3000 MHz entrando en

la banda de SHF) y distancias de 1 Km a 100 Km. Puede ser usado para alturas de la antena de la estación baso en el rango de 30 m a 1000 m.

El modelo Okumura-Hata desarrollado por Masaharu Hata en 1980 y tomando como base el modelo Okumura antes señalado, consiste en un conjunto de ecuaciones que permite estimar las pérdidas de propagación en diferentes tipos de zonas (urbana, semiurbana y abierta o rural).

En la actualidad es uno de los modelos más utilizados en la planificación y dimensionamiento del segmento de propagación de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones.

Se debe tener en cuenta que las ganancias o pérdidas de propagación de datos son constantes, y relativas al entorno radio. Tales parámetros incluyen, perdidas por penetración, perdidas del cuerpo, perdidas de alimentación, y ruido de fondo. Para obtener un valor objetivo cuando comparamos el cálculo del enlace, debemos configurar unos parámetros de propagación iguales.

4.1.1 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

A continuación, se presenta el procedimiento seguido para la obtención de los datos y su posterior análisis:

1. Seleccionar el lugar de medición.
2. Clasificar el lugar según el grado de obstrucción presente (leve, parcial, critico o grave).
3. Obtener la distancia existente entre el equipo transmisor y receptor usando los datos de posicionamiento proporcionados por un GPS.
4. Implementar, configurar y poner en servicio el enlace.
5. Adquirir los datos mediante algún software de adquisición.
6. Predecir de manera teórica el nivel de señal esperado.
7. Comparación de los niveles teóricos esperados de señal con los obtenidos de manera empírica

4.1.2 Análisis los resultados

Una vez seleccionado el lugar de medición se debe tener en cuenta la limitación de distancia, que, en particular, reduce la aplicabilidad de las ecuaciones de Hata al diseño de sistemas terrenales móviles terrestres distintos de los sistemas celulares. La limitación de altura también reduce la aplicabilidad de este modelo a estaciones instaladas en picos de montaña.

Para el análisis de este modelo se identifican cuatro categorías de obstrucciones de la primera zona de Fresnel del enlace, basados en la estimación que realizará el instalador cuando desee realizar la factibilidad del enlace.

Las zonas de Fresnel son regiones sucesivas del espacio, donde el trayecto de un rayo imaginario entre transmisor y receptor presenta un largo eléctrico que se encuentra entre $(n-1)\lambda$ y $n\lambda$, donde n es un número natural.

La Figura 2 muestra un plano virtual localizado entre el transmisor y receptor. Los círculos concéntricos en el plano forman el lugar geométrico del origen de todos los haces que se propagan hacia el receptor, que cumplen con la condición que el t

Los círculos son llamados zonas de Fresnel, y las contribuciones más relevantes de la señal que se obtiene en el receptor son las de las primeras zonas de Fresnel, es decir, aquellas para las cuales $n = 1, 2, 3, 4$.

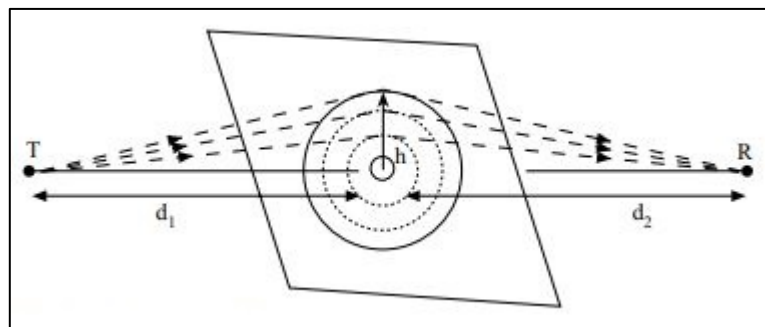


Figura 2. Zonas de Fresnel
Fuente: Biblioteca Digital UDA (2019)

Posteriormente en base a los criterios de la zona se clasifica el lugar según el grado de obstrucción, en el que puede presentarse:

Obstrucción Leve (L): Enlaces donde las obstrucciones se encuentran a un nivel muy inferior respecto de la línea directa de visión entre transmisor y receptor (90 % de la primera zona de Fresnel despejada). La propagación puede ser considerada equivalente a espacio libre.

Obstrucción Parcial (P): Enlaces donde las obstrucciones se encuentran a un nivel cercano a la línea de visión entre las antenas transmisoras y receptoras. En esta categoría es posible asegurar que existe, al menos, un 70 % de la primera zona de Fresnel sin obstrucción.

Obstrucción Crítica (C): Enlaces donde las obstrucciones se encuentran a un mismo nivel que la línea directa de visión entre la antena transmisora y receptora, por lo que es posible asegurar que la mitad de la primera zona de Fresnel se encuentra despejada.

Obstrucción Grave (G): Enlaces donde las obstrucciones se encuentran a un nivel por sobre la línea directa de visión entre la antena transmisora y receptora, por lo que la primera zona de Fresnel se encuentra despejada en menos del 30%.

En consecuencia, se realizó un resumido análisis de los modelos de predicción existentes a implementarse.

Primero mediante el modelo de propagación en espacio libre podemos obtener las pérdidas (PL: path loss) por propagación en espacio libre presente en cada uno de los enlaces a realizar y cuando el receptor está a una distancia “d” del transmisor. Lo anterior es representado por la ecuación:

donde:
$$\boxed{\hspace{10em}} \quad (3)$$

: Ganancia de la antena transmisora.

: Ganancia de la antena receptora.

Longitud de onda en metros.

d: Distancia entre la antena transmisora y receptora en [m]

En base al modelo Okumura, se puede decir que la distancia máxima de separación que puede existir entre el transmisor y el receptor es de hasta 100 km. En tal sentido las pérdidas existentes en el enlace pueden ser obtenidas mediante la ecuación:

$$\boxed{\phantom{L_{50}(f,d) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f d}{c} \right)^2 \frac{G_{ht} G_{hr}}{L_{50}(f,d) A_{mf}(f,d) G_{area}}}} \quad (4)$$

donde:

$L_{50}(dB)$: Pérdidas por propagación al 50% de recepción de señal.

$A_{mf}(f,d)$: Atenuación media relativa al espacio libre.

$G(h_{te})$: Ganancia de la antena transmisora [dB].

$G(h_{re})$: Ganancia de la antena receptora [dB].

G_{area} : Factor de corrección dependiente del entorno del lugar.

En tal sentido, $G(h_{te})$ varía a un índice de 20 dB/decada y $G(h_{re})$ varía a un índice de 10 dB/decada para alturas menores que 3 m.

—
—
—

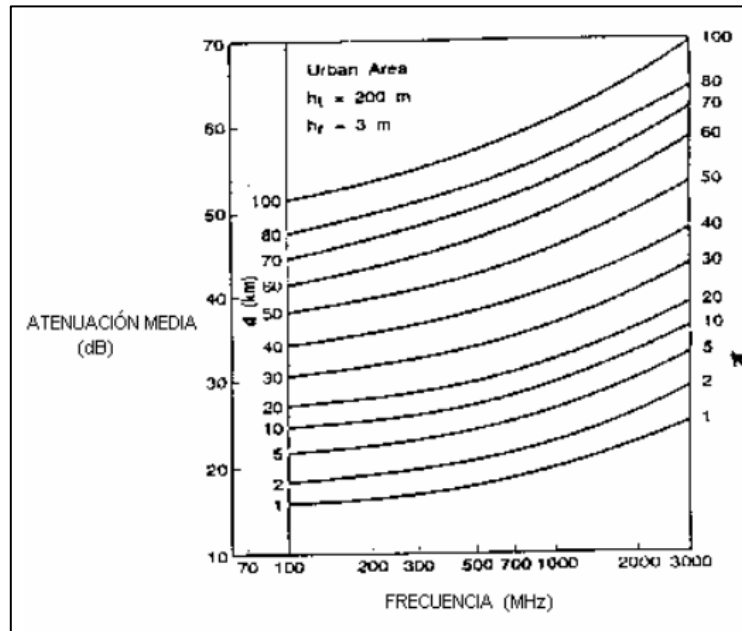


Gráfico 7. Tabla usada por Okumura para hacer predicciones
Fuente: Catarina (2019)

En base a esto, se pudo desarrollar un modelo de las pérdidas del enlace considerando factores de corrección dependiendo del tipo de terreno, aunque no es un modelo analítico.

Es uno de los modelos más simples y adecuados para las predicciones de atenuación para sistemas celulares y sistemas de radio terrestre en ambientes poblados. En las mediciones de la atenuación a diferencia con la predicción, presentan errores con una desviación estándar entre los 10 dB a 14 dB. Su desventaja es que, a pesar de ser bueno en zonas urbanas, no lo es en zonas rurales.

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:

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

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 3. La distancia entre dos nodos consecutivos se llama paso de la retícula representada con la letra d .

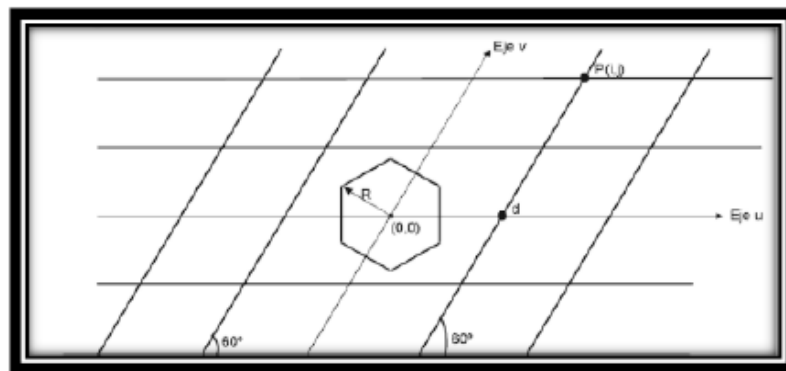


Figura 3. Retícula de planificación
Fuente: Comunicaciones móviles (2018)

- d : Paso 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 llama radio celular.

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

$$\boxed{=}$$
 (2.12)

Y la superficie de la célula será:

$$\boxed{= \text{---} = \text{---} = \text{---}}$$
 (2.13)

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

$$\boxed{\begin{array}{l} = \text{---} = \text{---}; \\ = \end{array}}$$
 (2.14)

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 4, 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.

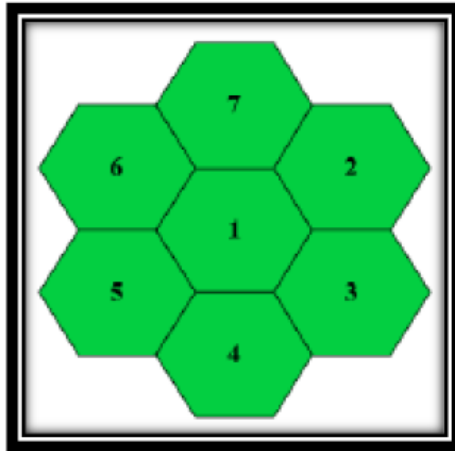


Figura 4. Clúster de 7 células

Fuente: Sistemas de comunicaciones móviles (2018)

- 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.

Este modelo se adapta muy bien para el diseño de sistemas de gran escala, pero no para sistemas PCS, los cuales tienen células del orden de 1 Km de radio.

Para este efecto se hace una formulación numérico-empírica de los datos gráficos entregados por el modelo Okumura de atenuación para zonas urbanas.

A pesar de que el modelo de Hata no tiene correcciones específicas para distintas rutas, que en cambio sí existen para el modelo de Okumura, las predicciones de Hata son muy similares a las predicciones de Okumura para distancias Tx-Rx mayores a 1 km.

El modelo Okumura-Hata y otros modelos empíricos generales proporcionan predicciones razonablemente exactas de la cobertura en los sistemas radioeléctricos móviles terrestres, cuando se aplican a un entorno semejante al utilizado para establecer el modelo. Se puede ampliar el alcance de aplicación de los modelos empíricos generales si se los sintoniza con algunas condiciones específicas del entorno. Esta

técnica se describe con detalle en el siguiente punto. Porque los modelos de Okumura y Okumura-Hata son modelos de predicción «punto a zona» no se deben usar para las predicciones punto a punto

El modelo Okumura-Hata tiene la ventaja de la simplicidad, ya que puede predecir el funcionamiento del sistema con un conjunto muy limitado de datos de entrada. Su formulación simple y directa se presta a un uso fácil en computadoras pequeñas o programas de hoja de cálculo. En el modelo, los principales determinantes de la intensidad de la señal son la frecuencia, la potencia radiada efectiva, las alturas de las antenas de recepción y de transmisión y la longitud del trayecto. Se ha convertido en el modelo «por defecto» de muchos tipos de herramientas de planificación.

La Recomendación UIT-R P.529 amplió la aplicabilidad de las ecuaciones de Hata a la distancia original de 100 km del modelo de Okumura. También incluía curvas de propagación en ondas métricas adaptadas a las aplicaciones móviles terrestres basadas en los métodos descritos en la Recomendación UIT-R P.370. Éstas han evolucionado hasta convertirse ahora en la Recomendación UIT-R P.1546, que ha ampliado las frecuencias, las alturas de antena y las distancias.

Para aplicar un modelo empírico general en una región determinada y de características “desconocidas” es conveniente probar el funcionamiento de un modelo seleccionado o comparar el funcionamiento de diversos modelos. Las pruebas se describen a continuación. Como transmisores de referencia, se pueden usar las estaciones radioeléctricas existentes (por ejemplo, las estaciones de base de sistemas móviles terrestres: celular, búsqueda, etc.). En cuanto a las mediciones, se puede usar cualquiera de los monitores RF de bolsillo para el terreno o, en circunstancias restrictivas, hasta las unidades de abonado de esos sistemas móviles terrestres objeto de la prueba que tengan funciones de monitoreo en el terreno.

Esto significa que las mediciones se pueden hacer con bastante rapidez y muy pocos recursos humanos y financieros. Para una descripción más formal y detallada de

las mediciones en el terreno, sírvase remitirse al Manual de comprobación técnica del espectro de la UIT.

Si bien cuantas más mediciones se hagan tanto mejor serán los resultados, para hacer una prueba no muy exhaustiva del modelo empírico quizás baste realizar mediciones estáticas de terreno en zonas de cobertura de al menos dos o tres transmisores radioeléctricos existentes. Ahora bien, es importante asegurarse de que estas zonas de cobertura se hayan elegido para las pruebas, de forma que representen las condiciones de propagación más típicas de esa región (urbana/suburbana, densidad de la vegetación, irregularidades del terreno, etc.). En cada una de las zonas de cobertura seleccionadas, es conveniente hacer mediciones de terreno con al menos 15-20 distancias diferentes con respecto al transmisor.

Para cada una de estas distancias, la muestra de mediciones debe incluir al menos 5-10 mediciones, tomadas de preferencia en direcciones diferentes con respecto al transmisor, para asegurar la correcta evaluación de la intensidad de campo mediana. Cuando los transmisores utilizados en la prueba tienen antenas direccionales, los puntos de medición deben estar todos dentro del haz principal de la antena del transmisor.

Los primeros despliegues de la 5G se harán en los sitios 4G existentes con implementación de antenas, sin necesidad de densificar los sitios, gracias a la tecnología “Massive MIMO (que crea múltiples haces), la utilización conjunta de varias bandas de frecuencia y la agregación con la 4G.

Estas antenas inteligentes, constituidas por una gran cantidad de antenas miniaturizadas, permiten alcanzar velocidades y una capacidad de transmisión actualmente inaccesibles con la 4G.

La antena m-MIMO actúa como un faro direccional en donde la señal es dirigida a una dirección precisa en vez de ser emitida en todas las direcciones. La m-MIMO limita así la pérdida de energía emitiendo las ondas radio únicamente allí donde son útiles. Permite dirigir la señal de radio hacia los usuarios y los dispositivos a pedido, más bien que emitir permanentemente y por todas partes, eliminando así las ondas superfluas en los alrededores de los usuarios.

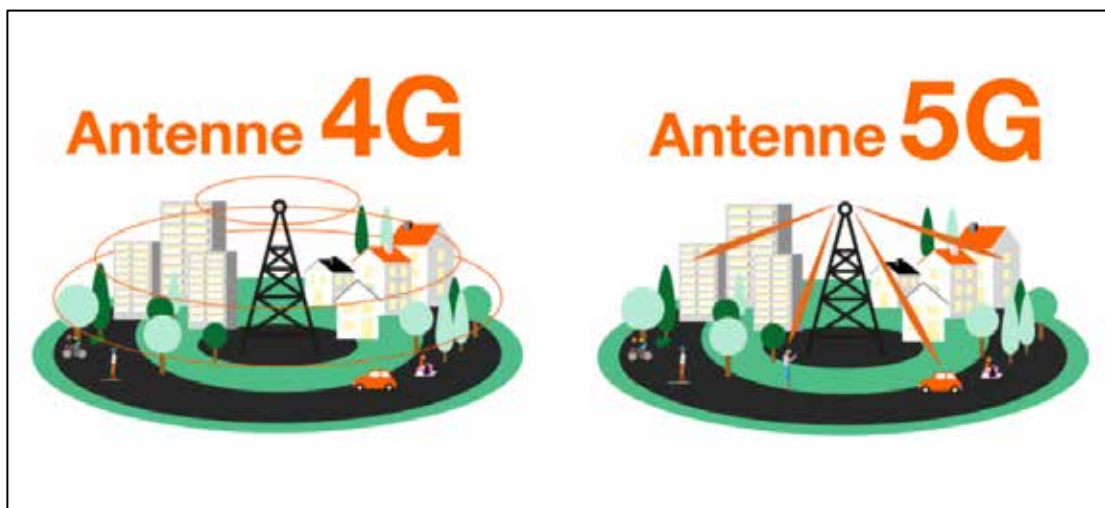


Figura 5. Comparación de campo antenas 4G y antenas 5G m-MIMO direccional
Fuente: Orange (2019)

En un segundo tiempo, se podrán añadir sitios radio adicionales para responder a la necesidad capacitaría local o para desplegar ofertas de acceso fijo inalámbrico.

Las antenas 5G son más pequeñas que las utilizadas actualmente y estarán sujetas a las mismas obligaciones de informaciones y de instalación, en particular en materia de seguridad. Entonces se definirá un perímetro de seguridad conforme a los niveles de exposición reglamentarios durante la instalación

Con dichas antenas se obtienen conexiones mucho más rápidas, con menor latencia, con mayor capacidad, y mayor cobertura que con el 4G actual. Además, las antenas 5G flotantes permiten aumentar aún más esta cobertura.

Las mismas operan entre los 30 y los 300 GHz, y como se señaló se encuentran “flotando” o suspendidas, esto con el fin de aumentar la potencia y aliviar el espectro electromagnético.

Dentro de las antenas que se pueden emplear se encuentran:



Figura 6. Antena del sector 5G con tecnología mimo 4x4, 4 puertos para la mimosa A5C
Fuente: Lanbowan Company

Presenta las siguientes especificaciones dominantes y características especiales:

- Gama de frecuencia: 4.9-6.4GHz
- Impedancia: 50 ohmios
- VSWR:
- Aumento: 4x15dBi
- Frente para apoyar el ratio: >30dB
- Polarización: Doble se dobla la inclinación, $\pm 45^\circ$
- Amplitud de rayo horizontal 3dB: el 90°

- Amplitud de rayo vertical 3dB: 7°
- Energía de entrada máxima: 200W
- Protección de la iluminación: Tierra directa
- Lugar del conector: Parte inferior
- Conector: N-femenino



Figura 7. Antena de plato 4.9-6.5GHz con 60cm de diámetro MIMO Ubiquiti RocketM5, PTP RocketDish, mimosa C5X
Fuente: Lanbowan Company

Presenta las siguientes especificaciones dominantes y características especiales:

- Frecuencia 4.9-6.5GHz
- Alta ganancia 30dBi
- MIMO
- Se dobla la inclinación
- Pies de plato

Usos:

- 4.9/5.1/5.3/5.4/5.8/6.4 gigahertz banda del ISMO y de UNII
- Usos MIMO y 802.11n • Usos de WiMax

- Regreso y de punto a punto de larga distancia

Especificaciones técnicas

Modelo	ANT4965D30P6-C5X
Gama de frecuencia	4.9-5.1GHz/5.1-5.9GHz/5.9-6.5GHz
Aumento (dBi)	29dBi/30dBi/31dBi
VSWR	<2.5 <2.0 <2.0
Polarización	Se dobla la inclinación
Aislamiento	>30dB
Frente para apoyar el ratio	>35dB
Anchura de haz horizontal	5 grados
Anchura de haz vertical	5 grados
Poder máximo por puerto	50W
Impedancia	
Protección de la iluminación	Tierra de DC
Conector	C5X
Tamaño de la antena	
Peso de la antena	6.5kg
Color de la antena	blanco
Material del plato	aluminio
Diámetro del poste	
Temperatura operativa	-40°C a +70°C (- 32°F a +158°F)



Figura 8. Antena del sector 5G con tecnología mimo 4x4, 4 puertos para la mimosa A5C
Fuente: Lanbowan Company

Presenta las siguientes especificaciones dominantes y características especiales:

- Gama de frecuencia: 4.9-6.4GHz
- Impedancia: 50 ohmios
-
- Aumento: 4x18dBi
- Frente para apoyar el ratio: >30dB
- Polarización: Doble se dobla la inclinación, $\pm 45^\circ$
- Amplitud de rayo horizontal 3dB: el 90°
- Amplitud de rayo vertical 3dB: 7°
- Energía de entrada máxima: 200W
- Protección de la iluminación: Tierra directa
- Lugar del conector: Parte inferior

- Conector: N-femenino

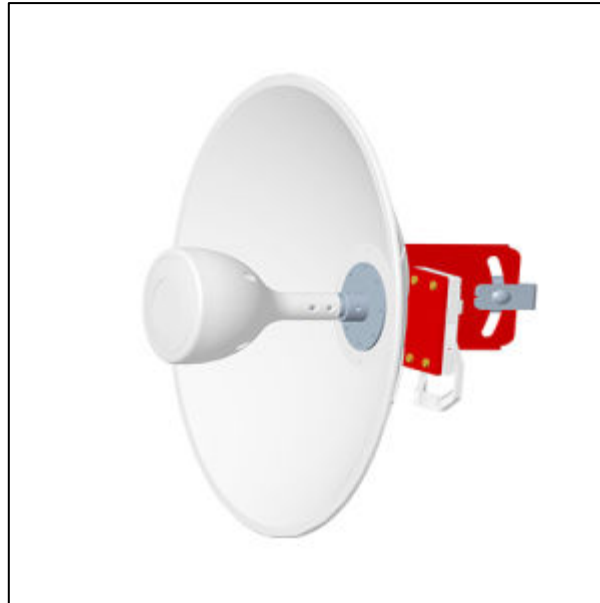


Figura 9. Antena de plato al aire libre 1.7-3.8GHz LTE/5G 4G/LTE, con movimiento e inclinación ($\pm 45^\circ$)

Fuente: Lanbowan Company

Presenta las siguientes especificaciones dominantes y características especiales:

- Antena de plato al aire libre de 1.7-3.8GHz LTE/5G

Características

- Frecuencia 1.7-3.8GHz
- Alta ganancia de 17dBi
- MIMO
- Inclinación dual de ($\pm 45^\circ$)

Usos:

- Trabaja en cualquier red celular 4G/LTE/5G
- El diseño dual de la antena MIMO que mejora funcionamiento

Eléctrico	
Modelo	ANT1738D17P-XP
Gama de frecuencia	1710-2690MHz/3300-3800MHz
Aumento	15dBi/17dBi
VSWR	<2.0/<2.0
Polarización	Se dobla la inclinación (- +45 grados)
Aislamiento	>20dB
Frente para apoyar el ratio	>28dB
Anchura de haz horizontal	20°
Anchura de haz vertical	20°
Poder máximo por puerto	50W
Impedancia	
Protección de la iluminación	Tierra de DC
Mecánico	
Conector	2 * hembra de N
Tamaño de la antena	
Peso de la antena	1.5kg
Color de la antena	blanco
Diámetro del poste	
Inclinación mecánica	± 20°
Temperatura operativa	-40°C a +70°C (- 32°F a +15°F)

Una vez definida la antena a emplearse hacia el receptor de prueba se montará la misma a una altura apropiada, que para los servicios móviles terrestres es de 1,5-2 m. Lo más conveniente es efectuar esas mediciones a lo largo de la ruta radial disponible (por ejemplo, una carretera) dentro de la zona de cobertura y en los puntos a intervalos determinados, por ejemplo, de 1 km. Uno de los posibles montajes para efectuar esas mediciones de los obstáculos se muestra.

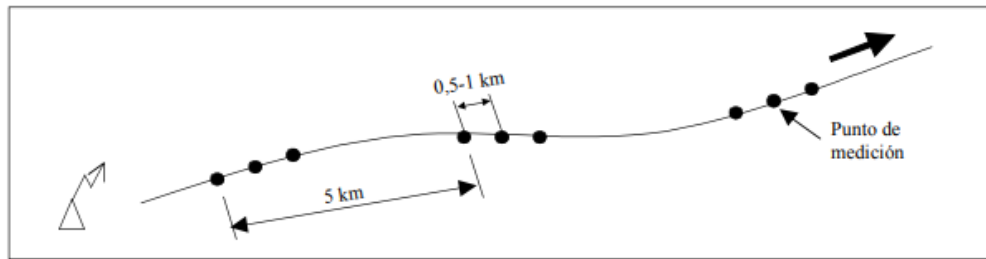


Gráfico 9. Ejemplo de puntos de medición de los obstáculos a lo largo de una ruta radial desde el transmisor de referencia
Fuente: ITU (2019)

En cada uno de los puntos de medición se registra la mediana de la intensidad de campo en función de la distancia desde el transmisor. Puesto que en este caso la cantidad de mediciones es muy limitada, se pueden hacer no de forma automática sino registrando manualmente las intensidades de campo medidas. Las distancias con respecto al transmisor se pueden determinar con cualquier instrumento disponible: un receptor GPS que permita medir diferencias de distancia, el odómetro de un auto que transita por una ruta estrictamente radial, o un mapa a la escala adecuada.

4.2 FASE II: Identificar las frecuencias usadas en 5G.

4.2.1 Tecnología 5G.

El 5G es el nombre de fantasía de la quinta generación de telefonía celular, la cual deberá tener una velocidad de descarga de información 100 veces más rápida que las mejores tecnologías actuales, y que deberá estar lista para comercializarse en 2020 y ofrecerá un abanico de oportunidades tecnológicas que hoy no son realizables con 4G (desde conectividad total y vehículos autónomos hasta Internet de las Cosas) y se

espera que genere ganancias globales del orden de billones de US dólares dentro de los primeros años de funcionamiento.

Junto a las oportunidades, 5G también supone varios desafíos. En lo social, un aumento de la brecha digital entre quienes tengan acceso a 5G (entornos urbanos y/o de alto poder adquisitivo) y quienes no tengan (zonas rurales y/o de bajos recursos), lo que se expresaría en más desigualdad económica, de desarrollo social y territorial.

Las principales recomendaciones internacionales están enfocadas en promover adecuadamente el desarrollo de nuevas infraestructuras, armonizar el espectro radioeléctrico, potenciar los puntos de acceso a la ciudadanía y asegurar entornos que fomenten el desarrollo de nuevos servicios.

Para ello, proponen la generación de hojas de ruta que contemplen la reestructuración de las concesiones de telefonía, la experimentación y la instalación de infraestructuras.

Se espera que la velocidad binaria máxima de las IMT-2020 (International Mobile Telecommunications-2020 son los requisitos emitidos por el Sector de Radiocomunicaciones de la UIT) para la banda ancha móvil mejorada alcance los 10 Gbit/s. Ahora bien, en ciertos casos y circunstancias, las IMT-2020 podrían llegar alcanzar una velocidad máxima de 20 Gbit/s. Las IMT-2020 podrán soportar diferentes velocidades binarias de usuario, que abarque diversos entornos de la banda ancha móvil mejorada. Para los casos de cobertura de área extensa, por ejemplo, en zonas urbanas y suburbanas, cabe esperar una velocidad binaria de usuario de 100 Mbit/s. En los casos de zonas de acceso inalámbrico, se espera que la velocidad experimentada por el usuario alcance valores más elevados (por ejemplo, 1 Gb/s en interiores).

Cabe prever que, en el caso de la banda ancha móvil mejorada, los valores de eficiencia espectral tripliquen los de las IMT-Avanzadas. El posible aumento en eficiencia con respecto a las IMT-Avanzadas dependerá de las circunstancias y podría llegar a ser superior (por ejemplo, cinco veces superior, a reserva de las futuras

investigaciones). Se espera que las IMT-2020 alcancen una capacidad de tráfico por unidad de superficie de 10 Mbit/s/m², por ejemplo, en las zonas de acceso inalámbrico.

El consumo de energía de las redes de acceso radioeléctricas de las IMT-2020 no debe ser mayor que el de las redes IMT existentes hoy en día, incluso aunque ofrezcan capacidades mejoradas. La eficiencia energética de la red debe, por tanto, aumentarse en un factor que sea como mínimo análogo al aumento previsto en la capacidad de tráfico de las IMT-2020 con respecto a las IMT-Avanzadas para la banda ancha móvil mejorada.

Las IMT-2020 podrán ofrecer una latencia radioeléctrica de 1 ms y soportar servicios con requisitos de muy baja latencia. Cabe asimismo esperar que las IMT-2020 permitan una elevada movilidad de hasta 500 km/h con una calidad de servicio (QoS) aceptable, especialmente, en el caso de los trenes de alta velocidad. Por último, se prevé que las IMT-2020 darán soporte a una densidad de conexión de hasta 10⁶/km², por ejemplo, en los casos de comunicación masiva entre máquinas.

	1G	2G	3G	4G	5G
Fecha aproximada de implantación	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s
Velocidad de descarga teórica	2kbit/s	384kbit/s	56Mbit/s	1Gbit/s	10Gbit/s
Latencia	N/A	629 ms	212 ms	60-98 ms	< 1 ms

Figura 10. Evolución de las redes móviles
Fuente IMT-2020 (2019)

4.2.1.1 Casos de uso de la 5G

Las elevadas velocidades y la baja latencia que promete la 5G impulsarán a las sociedades hacia una nueva era de ciudades inteligentes e Internet de las cosas (IoT). Las partes interesadas del sector industrial han precisado posibles casos de uso de las redes 5G y el UIT-R ha definido tres categorías importantes en la materia:

1) Banda ancha móvil mejorada (eMBB): Banda ancha mejorada en entornos interiores y exteriores, colaboración empresarial y realidad virtual y aumentada.

2) Comunicaciones masivas entre máquinas (mMTC): IoT, seguimiento de activos, agricultura inteligente, ciudades inteligentes, control energético, hogares inteligentes y seguimiento a distancia.

3) Comunicaciones ultrafiabiles y de baja latencia (URLLC): Vehículos autónomos, redes eléctricas inteligentes, vigilancia de pacientes a distancia y servicios de telesalud y automatización industrial.

4.2.1.2 Desarrollo para la generación 5G

El 5G, como se ha mencionado, está siendo definido dentro el estándar IMT-2020 de la ITU. Sus reportes periódicos pueden graficarse tal como se ve en el gráfico 8. Suponen desafíos regulatorios y tecnológicos a múltiples niveles, para los cuales las “autoridades nacionales de reglamentación” o ANR, en la nomenclatura ITU, se están preparando con pruebas de campo y adaptaciones regulatorias.

Entre los países que cuentan con una hoja de ruta están los de la Unión Europea, Corea del Sur, Estados Unidos, Chile y otros.

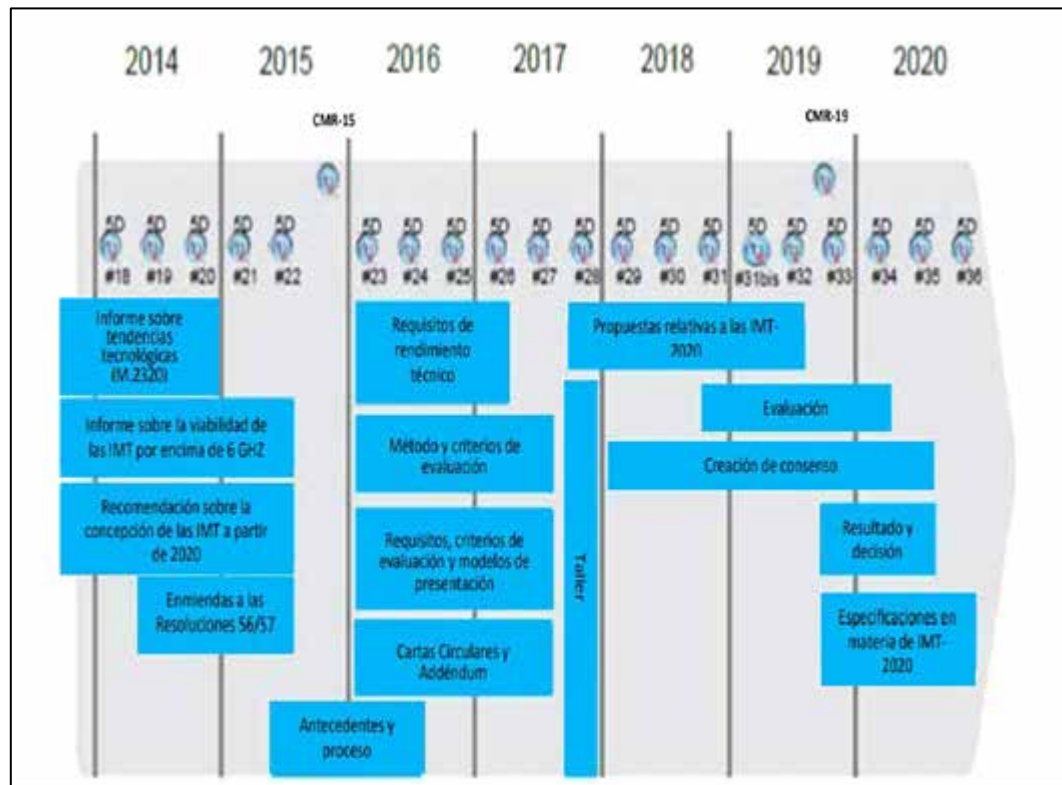


Gráfico 10. Cronograma y proceso detallados para las IMT-2020
Fuente: ITU (2019)

4.2.2 Espectro radioeléctrico para 5G

El espectro radioeléctrico es de máxima importancia para la industria de las telecomunicaciones y, en especial, para el sector móvil. Estas comunicaciones móviles han posibilitado la comunicación con personas en movimiento fuera de sus lugares fijos de referencia, para progresivamente haber sido las responsables de unir localidades remotas, permitir la unión de familias distantes y, durante los últimos años, han sido las responsables del primer acceso a Internet para millones de personas. La asignación de espectro para la industria móvil es un requisito indispensable para la Sociedad del Conocimiento y el desarrollo económico de los países

La distribución del espectro radioeléctrico está a cargo de la ITU, la cual entrega las directrices específicas para el uso en diferentes servicios (satélites, comunicaciones

personales, radares, uso militar, aeronáutico, marítimo, etc.). Son los países los que, dentro de las especificaciones de la ITU, deciden (a través de las autoridades regulatorias) la manera de entregar porciones de espectro a los operadores, reservar espectro para tecnologías futuras o establecer áreas del espectro que no son licenciables.

Según la organización GSMA (la cual reúne operadores de telefonía, fabricantes de equipos y software, compañías de internet y otros actores), para el despliegue óptimo de 5G se requiere de un trabajo fundamental de los reguladores locales. En este marco, en noviembre de 2018 publicó una recomendación para reguladores sobre el uso del espectro en la nueva tecnología.

El UIT-R está analizando la viabilidad técnica del futuro espectro 5G en las frecuencias comprendidas entre 24 y 86 GHz basándose en otros estudios realizados recientemente (y en fase de elaboración) por numerosos miembros del sector. Las soluciones basadas en la tecnología MIMO y la conformación de haces son cada vez más factibles en frecuencias más elevadas. Las bandas inferiores y superiores a 6 GHz podrían utilizarse de manera complementaria para 2020 y años posteriores.

En tal sentido, se requiere espectro en tres gamas de frecuencias “fundamentales para proporcionar una cobertura extendida y soportar todas las formas de uso”.

Estas son:

- Por debajo de 1 GHz (para entornos urbanos y rurales, orientado al Internet de las Cosas).
- Entre 1 y 6 GHz (para los servicios iniciales de 5G).
- Por encima de 6 GHz (en especial las bandas de 26 GHz y/o 28 GHz, que serían las que tienen mayor apoyo internacional).

Atribuciones al servicio móvil existentes	Ninguna atribución mundial al servicio móvil
24,25-27,5 GHz	31,8-33,4 GHz
37-40,5 GHz	40,5-42,5 GHz
42,5-43,5 GHz	
45,5-47 GHz	47-47,2 GHz
47,2-50,2 GHz	
50,4 GHz-52,6 GHz	
66-76 GHz	
81-86 GHz	

Figura 11. Nuevas bandas de espectro objeto de estudio de cara a la CMR-19
Fuente: ITU (2019)

En todo caso, la GSMA recalca que ésta será una de las materias de la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de la UIT en 2019 (CMR-19): establecer un acuerdo sobre las bandas 5G por encima de 24 GHz.

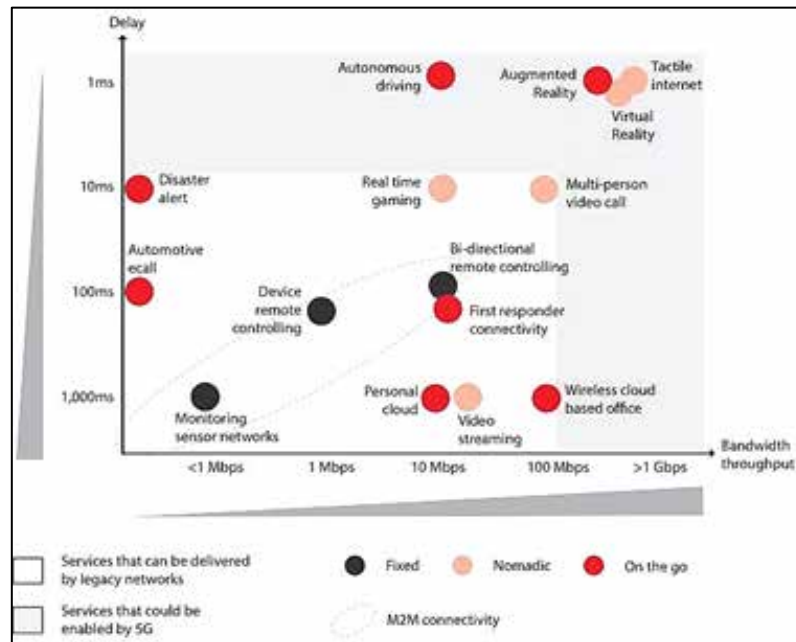


Gráfico 11. Distribución de los principales servicios que esperan de 5G, según el ancho de banda y la latencia (tiempo de respuesta) esperada
Fuente: GSMA Intelligence (2014)

El gráfico anterior señala una muestra en gris de aquellos servicios que se espera de la 5G como, por ejemplo, automóviles autónomos, realidad aumentada, internet táctil, realidad virtual, las que requerirán una latencia mínima, así como un ancho de banda mayor a un Gbps.

Esto grafica cómo los distintos servicios prometidos por la 5G requieren un alto ancho de banda, pero también que las tecnologías actuales (3G y 4G) seguirán existiendo como hasta ahora.

Los casos de uso relativos a la 5G pueden materializarse en una variedad de frecuencias de espectro. Por ejemplo, las frecuencias mmWave (por encima de 24 GHz) podrían resultar adecuadas para aplicaciones de baja latencia y corto alcance (aptas para zonas urbanas densas) y las frecuencias inferiores a 1 GHz para aplicaciones de largo alcance y escaso ancho de banda (idóneas para zonas rurales).

Si bien las frecuencias más bajas presentan mejores características de propagación y brindan una mayor cobertura, las frecuencias más altas soportan anchos de banda más amplios debido a la gran cantidad de espectro disponible en las bandas de ondas milimétricas. Huawei, por ejemplo, ha propuesto un enfoque espectral multicapa, que ilustra este planteamiento a la perfección.

El desafío para las ANR (Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones), consistirá en seleccionar bandas de espectro armonizadas a escala mundial para la 5G. A fin de lograr este objetivo, lo mejor será tener en cuenta las decisiones pertinentes de la CMR-19 respecto de las bandas superiores, así como las decisiones de la CMR-07 y la CMR15 respecto de las bandas inferiores. Si bien la CE ha señalado que el espectro de 700 MHz desempeña un papel esencial en la provisión de cobertura a zonas extensas e interiores para servicios de 5G, este recurso también podría utilizarse en algunas partes de África para mejorar la cobertura 4G. Cabe prever que, de aquí a 2020, solo el 35% de la población subsahariana goce de cobertura 4G y que numerosas zonas rurales dispongan de poca cobertura móvil 4G o incluso carezcan de ella. Esta última cifra equivale a un 78% del promedio mundial.

Por consiguiente, los responsables de la formulación de políticas de África subsahariana podrían considerar la posibilidad de utilizar el espectro de 700 MHz como solución idónea para ampliar la cobertura 4G en zonas rurales en lugar de destinarlo a la introducción de la 5G.

- **Capa de cobertura:** Explora el espectro por debajo de 2 GHz (por ejemplo, 700 MHz) proporcionando cobertura a zonas extensas y en lo más recóndito de entornos interiores.
- **Capa de capacidad y cobertura:** Se basa en espectro perteneciente a la gama entre 2 y 6 GHz para ofrecer el mejor equilibrio entre capacidad y cobertura.
- **Capa de súper datos:** Se basa en espectro por encima de 6 GHz y mmWave para abordar casos de uso específicos que requieren velocidades de datos extremadamente altas.

Figura 12. El enfoque espectral multicapa de Huawei

Fuente: Huawei 5G Spectrum (2019)

4.2.2.1 Armonización del espectro radioeléctrico para 5G

Se entiende la armonización como la definición de frecuencias que se utilicen para los mismos servicios en diferentes países. La armonización permite generar economías de escala para equipamientos y dispositivos y servicios como el roaming.

La tecnología 5G necesita una cantidad considerable de espectro móvil nuevo y armonizado, por lo que se debería priorizar la desfragmentación y liberación de las bandas principales. Los reguladores deberían intentar facilitar 80- 100 MHz de espectro contiguo por operador en bandas medias 5G principales (es decir, de 3.5 GHz) y alrededor de 1 GHz por operador en bandas de ondas milimétricas (es decir, de 26/28 GHz).

Para ello, la UIT divide al mundo en tres regiones:

- **Región 1:** Estados Árabes, África, Europa, Comunidad de Estados Independientes
- **Región 2:** Américas
- **Región 3:** Asia-Pacífico

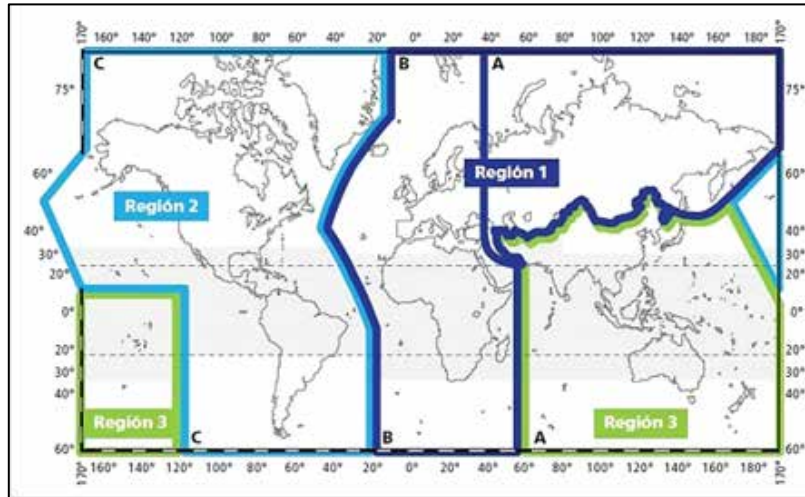


Gráfico 12. División Global para la Atribución de Frecuencias
Fuente: ITU (2019)

En la Región 2, la Comisión Interamericana de Telecomunicaciones (CITEL), parte de la Organización de Estados Americanos (OEA), es la encargada de aunar propuestas del sector público y privado sobre el uso del espectro radioeléctrico

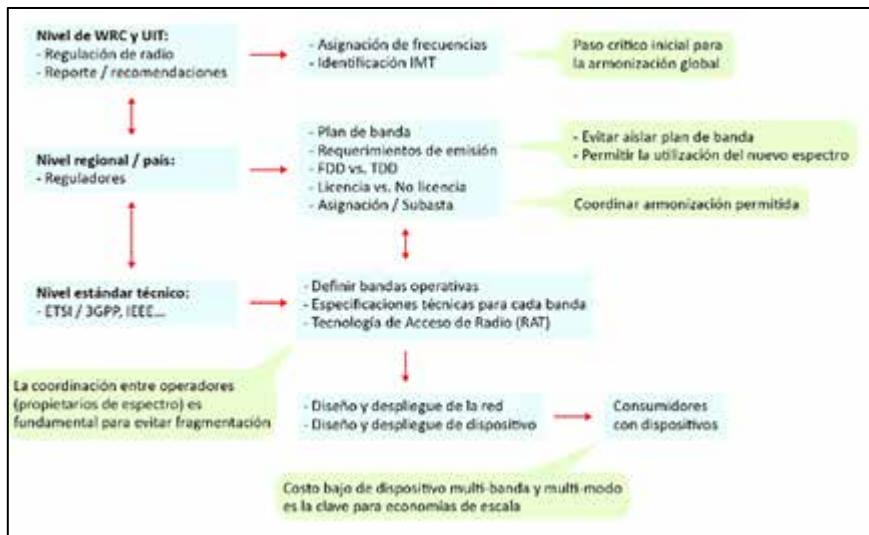


Figura 13. Espectro en América Latina y el Caribe para 5G: bandas medias y altas
Fuente: ITU (2019)

4.2.3 Bandas del espectro radioeléctrico para 5G

Las bandas de espectro en rango medio aptas para servicios móviles ofrecen un balance entre cobertura y capacidad de transmisión de datos que han contribuido al despegue de la banda ancha móvil en América Latina.

Es importante que los países asignen capacidad que tienen disponible en bandas medias y que planifiquen el uso de bandas pioneras para 5G en este rango, como la de 3,5 GHz.

El espectro radioeléctrico es un vital para las telecomunicaciones móviles por ser su medio de propagación. Conforme el uso de la banda ancha móvil se incrementa, los operadores de red requieren acceso no solo a más cantidad de espectro, sino a capacidad que se encuentra en distintos tipos de banda para garantizar condiciones del servicio que van desde cobertura hasta velocidades de descarga de datos.

La industria móvil no detiene su avance, América Latina ya cuenta con redes más evolucionadas, potentes y robustas con LTE-Advanced, y algunos operadores han realizado pruebas y demostraciones de la futura IMT-2020 (5G), aunque, es importante destacar que América Latina se encuentra rezagada en la entrega de espectro para servicios móviles al tomar como referencia los valores necesarios sugeridos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

Durante los últimos años, muchos mercados de América Latina han realizado subastas de espectro, aunque aún el espectro adjudicado se muestra distante a las sugerencias de la UIT. El Reporte de Radiocomunicaciones para Móviles, Radio determinación Amateur y Servicios Satelitales Relacionados 2078 (ITU-R M. 2078), tanto como el Reporte de la misma temática 2290 (ITU-R M. 2290) sugieren asignar 1300 MHz para comunicaciones móviles desde el 2015 y 1280 MHz para entornos de mercados más bajo y 1960 MHz para entornos de mercados más altos para 2020.

Más allá de las recomendaciones de la UIT en términos de cantidad de espectro, para que los operadores móviles utilicen el recurso radioeléctrico, el mismo debe ser adjudicado y encontrarse limpio, es decir, sin interferencias de otros servicios. Estos

últimos dos pasos recaen en las administraciones de los países y son, en definitiva, los que llevan mayores plazos.

Suele ocurrir que la limpieza del espectro no es posible de forma inmediata ya que el recurso espectral está ocupado y, en muchas ocasiones, no se tiene información precisa de quién lo ocupa. En América Latina ha ocurrido que se ha licitado espectro “sucio”, con lo cual el costo de limpieza y mudanza de servicios puede caer en los operadores móviles. Los aspectos a considerar para la limpieza del espectro incluyen el tipo de servicios ofrecidos, la ubicación geográfica del operador establecido, la frecuencia con la que el operador tradicional utiliza el espectro, entre otros factores.

Si bien no existe una solución única para la introducción del servicio móvil en frecuencias ya ocupadas y con potencial de espectro para banda ancha móvil, los reguladores deben considerar los diferentes aspectos para determinar la “limpieza” de la banda o la ubicación de varios servicios en una misma porción de espectro, con la prudencia requerida para evitar interferencias.

Se ha visto en América Latina que en varias oportunidades los costos de limpieza del espectro recaen en los operadores móviles. 5G Américas sostiene que mientras más se demore la cantidad de espectro que puede utilizarse para servicios móviles, mayor la demora en la llegada de nuevas tecnologías. Una de las bandas más propicias para acelerar la adopción de servicios de banda ancha móvil es la que surge del denominado dividendo digital, o banda de 700 MHz. La banda del dividendo digital se define como el segmento superior de la banda UHF, comprendida entre los 698 MHz y 806 MHz en el caso de las Américas.

4.2.3.1 Bandas de frecuencia 600 MHz

La banda de 600 MHz tiene características de propagación similares a la de 700 MHz lo que la habilita a ofrecer más capacidad para servicios móviles en zonas rurales y altas facultades de penetración para espacios interiores (hogares, edificios), siendo, una penetración “indoor”, es decir, al interior de edificios y construcciones a diferencia

de bandas de mayor densidad. Siempre las bandas bajas, menores a 1.000 MHz tienen una mayor penetración en estos espacios.

En América, la banda de 600 MHz está comprendida entre los 614-698 MHz. Para la utilización de servicios móviles, la TDT debería migrar hacia canales por debajo del canal 37 (608-614 MHz) y quedarían disponibles 70 MHz para dividirse en bloques que puedan asignarse a los operadores móviles. Otras frecuencias bajas como la banda de 700, 800, 850 y 900 MHz pueden utilizarse para fines similares en el contexto de LTE y la transición hacia 5G, pero en América Latina pueden estar ya ocupadas por otros sistemas de comunicación o al menos estar parcialmente utilizadas para mantener las redes 3G y 2G

Así, para la Región 2 (América), la banda de 600 MHz (614 MHz-698 MHz) está atribuida a título primario para Radiodifusión, y como uso secundario para servicios Móvil y Fijo.

Como resultado, la banda 614-698 MHz (banda 600 MHz) mantuvo su asignación primaria para servicios de transmisión en la Región 2 con asignaciones secundarias para servicios móviles y fijos¹⁶. Bahamas, Barbados, Belice, Canadá, Colombia, Estados Unidos y México fueron los países que mantuvieron o asignaron la banda de 614-806 MHz para servicios móviles primordialmente. Otros países como Chile, Cuba, Guyana, Jamaica y Panamá asignaron la banda de 614-806 MHz para servicio móvil como uso primario, sujeto a ulteriores acuerdos, según lo establecido en la WRC-15.

4.2.3.2 Bandas de frecuencia 700 MHz

La banda de 700 MHz tiene como una de sus principales características la amplia propagación de señal. Es decir que se puede cubrir un área determinada con menos radio bases que en frecuencias más altas

La liberación de la banda de 700 MHz (698-806 MHz) guarda relación con la migración de señales analógicas de TV abierta al formato digital. Esta migración de señales televisivas de una parte del espectro a otro da como resultado lo que se conoce como dividendo digital.

Es decir, el espectro liberado por las televisoras puede utilizarse para servicios móviles.

La banda de 700 MHz puede asignarse a los operadores móviles incluso antes de que culmine el apagón analógico, pero es esencial que se complete la limpieza de la banda para poder utilizarla para la provisión de conectividad móvil. Como se ilustra en este apartado, varios de los países que no han culminado la fase del apagón analógico ya asignaron bloques de la banda de 700 MHz para telecomunicaciones móviles y en algunos casos su uso ha permitido el despliegue de redes LTE-Avanzado (LTE-A).

Bolivia y varios mercados del Caribe eligieron la canalización del espectro estadounidense.

Estas diferentes decisiones traen problemas de armonización, ya que la canalización de bandas en EEUU difiere del APT 700, lo que las vuelve incompatibles. El 3GPP designó cuatro bandas operativas para los EEUU (Bandas 12, 13, 14, 17) y dos para APT (Banda 28 para el modo FDD – División Dúplex por Frecuencia- y Banda 44 para la versión TDD – División Dúplex por Tiempo).

Las diferencias radican en que las bandas operativas tienen distintas ubicaciones dentro de la franja de 700 MHz. La mayor diferencia se encuentra donde se alojan las bandas de guarda. La canalización estadounidense, a su vez, presenta algunas inconsistencias, como la inexistencia de interoperabilidad in-band, es decir, los terminales que funcionan en la Banda 13 son incompatibles con aquellos que funcionan en otras bandas.

La mayoría de los de América Latina atribuyó la banda de 700 MHz para servicios móviles, como surgió de la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de la UIT de 2012. Allí se confirmó el espectro comprendido entre 698 MHz y 806 MHz para servicios móviles en las Américas (Región 2).

Si bien existen al menos 25 redes LTE desplegadas en el espectro de 700 MHz en América Latina, no en todos los casos estas ofertas están disponibles a nivel nacional.

En mercados como el de Argentina o Brasil, por ejemplo, la banda de 700 MHz estuvo disponible hasta varios años después de su asignación para servicios móviles (a nivel nacional en 2018 en Argentina y 2019 para Brasil). Parte del recurso radioeléctrico se encuentra ocupado por otros servicios, principalmente emisiones de señales televisivas, a las cuales tomará un tiempo –años- en migrarlas de posición espectral teniendo en cuenta las fechas del apagón analógico. Vale aclarar que los esfuerzos económicos para esta migración caen –como el caso de Brasil- en parte en manos de los operadores móviles que ya han pagado por el espectro.

Con motivo de lo anterior, la ocupación de la banda de 700 MHz no está exenta de interferencias, que dañan la calidad de los servicios, tanto de comunicaciones móviles como televisivos.

4.2.3.3 Bandas de frecuencia 800 MHz

La banda de 800 MHz (banda LTE 20) puede utilizarse para agregar banda ancha móvil en el futuro, pero la banda fue utilizada en América Latina en la década del 90. 16 Ibid 18 5G Americas - Estado de las Bandas de Espectro Radioeléctrico en América Latina: 600 MHz, 700 MHz, 2300 MHz, 2500 MHz y 3500 MHz y 2000 para sistemas de comunicación troncales (uso comercial, privado y oficial, dependiendo del país) que puede hallarse en uso aún.

En ese sentido, el agregar la banda de 800 MHz como recurso de espectro para los servicios inalámbricos en esos casos requeriría un período de reorganización de los actuales ocupantes y luego un mecanismo para asignarlo. Además, dependería del grado de adopción de los servicios 4G en el Mercado, ya que la reducción de abonos a 3G y 2G permitirían a los operadores planificar los “cierres” eventuales de esas redes o al menos utilizar más de sus tenencias de espectro para 4G y posteriormente 5G.

4.2.3.4 Bandas de frecuencia 2,3Ghz

De acuerdo con las actas finales de la CMR-15, la banda de 2,3 GHz (2.300-2.400 MHz) quedó como una de las porciones de espectro identificadas para las IMT. Las administraciones nacionales pueden destinarla para el desarrollo de las IMT,

aunque esta identificación no impide su utilización por otros servicios a los que está atribuida, ni establece prioridad alguna en el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT.

La banda de 2,3 GHz quedó atribuida al servicio móvil a título primario en las tres regiones de la UIT, lo que favorece su potencial como una banda global para su uso en servicios móviles, siempre y cuando las administraciones nacionales la identifiquen para el desarrollo de las IMT.

En la actualidad, el mayor uso que se hace de la banda de 2,3 GHz es para servicios Punto a Multipunto y suele utilizarse para ofrecer acceso fijo-inalámbrico a Internet.

Debido a la evolución tecnológica, los actuales prestadores de servicios en estas frecuencias podrían actualizar sus infraestructuras para ofrecer servicios fijos con tecnologías IMT o bien ver cómo el recurso espectral que poseen se revaloriza.

Otra ventaja de la banda 2,3 GHz es su estandarización como banda del 3GPP (banda 30) y la disponibilidad de equipos que ya la soportan.

Para la Región 2, el espectro comprendido entre 2300 MHz y 2400 MHz está atribuido de manera primaria a servicios Fijo, Móvil, Radiolocalización y, título secundario para Aficionados.

Varios países de América Latina han reservado las frecuencias comprendidas entre los 2300 MHz y 2400 MHz para futuros usos o servicios radioeléctricos determinados por avances tecnológicos, considerando además plazos para su despeje, dependiendo del país.

La habilitación efectiva de las frecuencias comprendidas entre los 2300 MHz y 2400 MHz otorgaría 100 MHz adicionales para la provisión de servicios móviles.

La banda de 2300 MHz tiene una particularidad en América Latina. La mayoría de las diferentes administraciones nacionales han atribuido esa parte del espectro para servicios móviles, pero no se han realizado licitaciones o asignaciones. En casos como el de Perú, se acaba de aprobar su reordenamiento.

En Brasil, el Comité de Uso del Espectro y de Órbita del regulador ANATEL (CEO) sometió a consulta pública el uso de las bandas de 2,3 GHz⁵⁶ por un plazo de 60 días. De acuerdo con el regulador, el espectro de 2,3 GHz es de destacada armonización mundial para sistemas IMT. Esta banda será ofrecida en la próxima subasta de espectro que tentativamente iniciará a principios de 2020, aportando 90 MHz de capacidad.

De los 90 MHz, 50 MHz se ofrecerán en 2020 como bloques nacionales y 40 MHz en bloques regionales. Se reservan 10 MHz para el servicio limitado privado y como banda de guarda.

ANATEL debe publicar la consulta sobre las bases de la próxima subasta durante el segundo semestre de 2019. La propuesta del plan de ofrecer 90 MHz de la banda 2,3 GHz dividida en 50 MHz nacionales y 40 MHz como bloques regionales está siendo divulgada por la ANATEL, pero todavía no se publica como parte de las bases de la licitación.⁵

En América Central, El Salvador analiza la posibilidad de destinar la banda de 2,3 GHz para el desarrollo de las IMT.

4.2.3.5 Bandas de frecuencia 2,5Ghz

La banda de 2,5 GHz puede atender la demanda creciente de banda ancha móvil debido a sus características de gran capacidad de transmisión bidireccional de datos, cualquiera sea sus modos para LTE: FDD (Frequency Division Duplex) y TDD (Time Division Duplex). El primero de ellos es utilizado para servicios móviles, en tanto que el segundo suele utilizarse para conexiones inalámbricas fijas.

A diferencia de la banda de 700 MHz, las frecuencias denominadas 2,5 GHz suelen utilizarse en zonas urbanas y suburbanas, con alta densidad poblacional. Uno de los motivos es su relativa escasa propagación de señal. El requerimiento de cobertura en la banda de 2,5 GHz

La banda de 2,5 GHz se utiliza para servicios fijos de sistemas multicanales digitales, para servicios de valor agregado (transmisión de datos) y sistemas

inalámbricos de TV paga. Sin embargo, una vez reconocida la banda como apta para IMT, la mayoría de los reguladores nacionales incorporaron el servicio móvil a sus cuadros de atribución de frecuencias. La disponibilidad de este espectro puede alcanzar los 190 MHz.

Operadores de diversos países que cuentan con espectro en 2.500 MHz para ofrecer servicios inalámbricos fijos han optado por modernizar su infraestructura hacia LTE.

Cabe destacar que la primera red con tecnología LTE a escala global fue lanzada en espectro 2,6 GHz por Telia Sonera en dos ciudades: Oslo (Noruega) y Estocolmo (Suecia), en diciembre de 2009.

El Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R) dispuso tres opciones de canalización de la banda de 2,5 GHz, aunque los países pueden optar por otras canalizaciones. En estos casos, se debe advertir que pueden perderse eficiencias técnicas, lo que redonda en ineficiencias económicas y, por lo tanto, un menor acceso a los servicios.

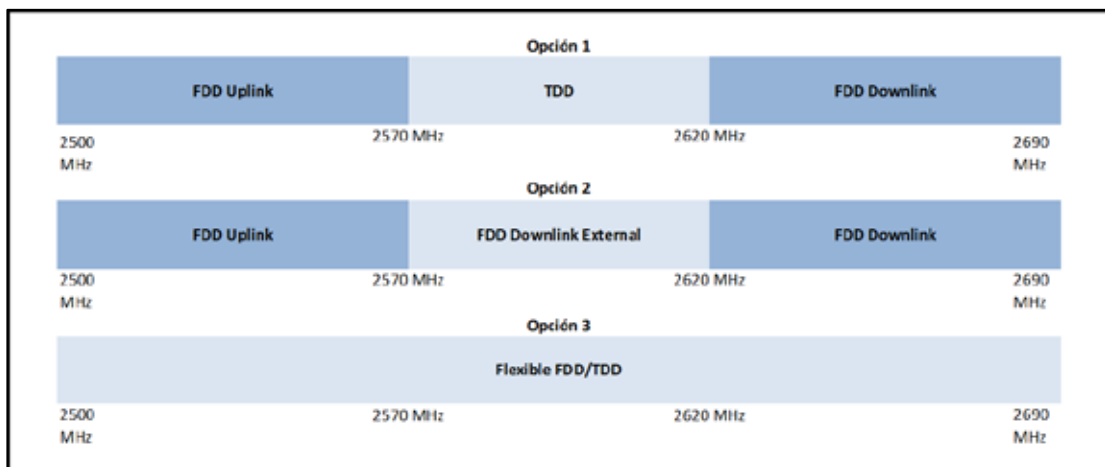


Figura 14. Opciones de canalización de la banda 2,5 GHz

Fuente: ITU (2019)

El creciente consumo de comunicaciones móviles, en especial servicios de datos sobre accesos de banda ancha, lleva a los operadores a la necesidad de contar con más capacidad de espectro. La identificación de las frecuencias comprendidas

entre 2.500-2.960 MHz como aptas para tecnologías IMT-2000 e IMT-Avanzado, sumado a la general ociosidad de la banda, llevó a un renovado interés de la misma, tanto del sector privado como del Estado.

Como se mencionó, el espectro de 2,5 GHz es ocupado mayormente por operadores para servicios de TV Paga, transmisión de datos y acceso a Internet. Sin embargo, por opciones de negocio, evolución tecnológica o disponibilidad a escala de ciertas tecnologías es una porción de espectro subutilizada.

Los diferentes modos de división de frecuencia -FDD (Frequency Division Duplex) y TDD (Time Division Duplex)- ofrecen a la banda de 2,5 GHz un gran atractivo para prestar servicios de datos móviles debido a su capacidad de transmisión de datos para zonas urbanas con alta densidad poblacional. Varios operadores de la región han comenzado a desplegar servicios LTE en la banda de 2,5 GHz.

La posibilidad de ofrecer LTE en 2,5 GHz despertó el interés de los operadores en esa frecuencia espectral, tanto para los operadores de servicios móviles, como para quienes tenían espectro en esa banda, quienes ven una nueva posibilidad de evolucionar sus negocios o una nueva valorización del recurso radioeléctrico.

La banda de 2,3 GHz en América Latina o Región 2, se encuentra comprendido entre 2300 MHz y 2400 MHz está atribuido de manera primaria a servicios Fijo, Móvil, Radiolocalización y, título secundario para Aficionados.

Varios países de América Latina han reservado las frecuencias comprendidas entre los 2300 MHz y 2400 MHz para futuros usos o servicios radioeléctricos determinados por avances tecnológicos, considerando además plazos para su despeje, dependiendo del país. La habilitación efectiva de las frecuencias comprendidas entre los 2300 MHz y 2400 MHz otorgaría 100 MHz adicionales para la provisión de servicios móviles.

La banda de 2300 MHz tiene una particularidad en América Latina. La mayoría de las diferentes administraciones nacionales han atribuido esa parte del espectro para

servicios móviles, pero no se han realizado licitaciones o asignaciones. En casos como el de Perú, se acaba de aprobar su reordenamiento.

A pesar de no estar asignada a operadores, varios países avanzan en el estudio de esta banda.

Banda de 2.300 MHz		
País	Atribución Móvil	Asignación
Argentina	No	
Bolivia	No	
Brasil	Sí	No
Chile	No	
Colombia	Sí	No
Ecuador	Sí	No
El Salvador	Sí	No
Guatemala	Sí	No
Honduras*	Sí	No
Nicaragua	Sí	No
México	Sí	No
Panamá	Sí	No
Paraguay*	Sí	No
Perú	Sí	Sí*
Rep. Dominicana	Sí	No
Uruguay	No	
Venezuela	Sí	No

Figura 15. Banda de 2.300 MHz en América Latina
Fuente: 5G Americas (2019)

Durante la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones del año 2000 (CMR-2000), realizada en Estambul, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) identificó nuevas bandas de espectro para tecnologías IMT-2000. Entre las bandas identificadas se encontraban aquellas comprendidas entre los 806-960 MHz, 1.710-1.885 MHz y 2.500-2.690 MHz.

Como se mencionó anteriormente, la banda de 2,5 GHz se utiliza para servicios fijos de sistemas multicanales digitales, para servicios de valor agregado (transmisión de datos) y sistemas inalámbricos de TV paga. Sin embargo, una vez reconocida la banda como apta para IMT (Telecomunicaciones Móviles Internacionales), la mayoría de los reguladores nacionales incorporaron el servicio móvil a sus cuadros de atribución de frecuencias. La disponibilidad de este espectro puede alcanzar los 190 MHz.

Operadores de diversos países que cuentan con espectro en 2.500 MHz para ofrecer servicios inalámbricos fijos han optado por modernizar su infraestructura hacia LTE. Cabe destacar que la primera red con tecnología LTE a escala global fue lanzada en espectro 2,6 GHz por Telia Sonera en dos ciudades: Oslo (Noruega) y Estocolmo (Suecia), en diciembre de 2009.

4.2.3.6 Bandas de frecuencia 3,5 Ghz

La banda de 3.500 MHz tuvo su momento de florecimiento a fin de la década de 1990 y principios de los años 2000, con tecnologías Wireless Local Loop (WLL). En ese tiempo, muchos países comenzaron la liberalización de los mercados de telecomunicaciones y se pensó que el WLL era una forma rápida y económica de competir con los sistemas cableados de última milla de las redes telefónicas. Sin embargo, la tecnología no trasladó al terreno lo que en teoría era capaz de ofrecer y muchos planes de negocio se frustraron.

La banda de 3.500 MHz suele estar en uso, aunque subutilizada, en varios mercados que distribuyeron este espectro con licencias nacionales y regionales. Esto

representa un desafío para su reordenamiento y posterior utilización con tecnologías IMT.

Conforme se van mostrando los nuevos casos de uso posibles en el contexto de redes 5G, va asentándose la necesidad de utilizar una gran variedad de bandas en la próxima generación de tecnologías móviles. La armonización global del espectro no se limita a asignaciones idénticas de bloques de espectro y se han diseñado soluciones como el “rango de sintonización”, un concepto importante para el aprovechamiento de la banda de 3,5 GHz, pero también el rango entre 3,3 a 3,7 GHz.

Esta solución contempla que bandas adyacentes o casi adyacentes se consideren armonizadas, siempre y cuando los nuevos equipos sean reconfigurables para cubrir múltiples rangos.

De esta manera se obtiene un rango de ajuste que toma en cuenta la complejidad de armonizar el espectro a nivel internacional y en contextos de varias agencias reguladoras. El espectro de la banda 3,5 GHz está dentro de un rango (3,3-3,6 GHz) que puede armonizarse bajo el criterio de “rango de sintonización”

América Latina está en fases iniciales para la identificación de bandas medias y altas para tecnologías IMT-2020. Los avances de los diferentes países son dispares. Algunos reguladores, como el caso de ANATEL (Brasil) han comenzado tempranamente a identificar espectro para 5G y han elaborado planes al respecto. Otros aguardan las decisiones que se tomarán en la próxima CMR-19 para adecuar sus cuadros nacionales de atribución de espectro.

Espectro 3,3-3,7 GHz			
País	Atribución Móvil	Asignación	Comentarios
Argentina	No		3,3-3,4 GHz cuenta con atribución móvil a título secundario
Bolivia	Sí	No	3,3-3,6 GHz está atribuida a móvil a título primario, pero está destinada al acceso inalámbrico
Brasil	Sí	No	Atribuida al servicio móvil. ⁹¹
Chile	No		La banda 3,5 GHz se propone como nueva capacidad para licitarse
Colombia	Sí	No	
Ecuador	Sí	No	
El Salvador	Sí	No	3,4 a 3,6 GHz identificada para IMT; 3,3-3,4 GHz se destina a radiolocalización y 3,6-3,7 GHz a enlaces de radiodifusión
Guatemala	Sí	No	
Honduras	Sí		3,3-3,4 GHz cuenta con atribución móvil a título secundario y se utiliza para radiolocalización; 3,4-3,7 GHz tiene atribución móvil a título primario, pero se destina a sistemas fijos y proyectos de servicio universal
Nicaragua	No		
México	Sí	No	3,5 GHz se concesionó para acceso fijo-inalámbrico y licencias están en su última fase. Se contempla reordenarla para generar asignaciones. La banda 3,3 GHz se considera para el desarrollo de las IMT, pero hay sistemas gubernamentales utilizando la banda. La banda 3,5 GHz también es utilizada por sistemas satelitales gubernamentales.
Panamá	No		
Paraguay	Sí	No	
Perú	Sí	Sí*	
Rep. Dominicana	Sí	No	
Uruguay	Sí	No	
Venezuela			

Figura 16. Banda de 3.500 MHz en América Latina
Fuente: 5G Américas

Por lo pronto, el Cuadro de Atribución de Espectro indica que la banda de 3.300 MHz a 3.400 MHz está asignada al servicio móvil en carácter secundario.

En 2018, el Ente Nacional de Comunicaciones (ENACOM) emprendió un relevamiento del espectro radioeléctrico que estaría listo para fin de 2019 transcurso del año 2020. El estudio destacará la utilización actual del espectro y, en caso de que existan posibilidades, definir servicios que se puedan migrar teniendo en cuenta los costos asociados de migración.

De todas formas, para definir nuevas asignaciones el ENACOM esperará las definiciones que surjan de la CMR-19.

En Brasil, ANATEL subastará en 2020 la banda de 3,5 GHz en 2020 segmentándola en 3 bloques nacionales de 80 MHz y un bloque regional de 60 MHz (300 MHz en total).

Las bandas de frecuencias prioritarias en Chile para la introducción de los servicios 5G son las bandas 3.400-3.800 MHz y 27,5-28,35 GHz, para aplicaciones fijas y/o móviles. SUBTEL entiende que se han identificado en Europa y Estados Unidos, respectivamente, como prioritarias, por lo que su uso será inminente y próximas a ser implementadas comercialmente. El regulador no ha identificado una banda baja para IMT-2020.

La banda de frecuencias 3.400 - 3.800 MHz es considerada prioritaria para facilitar los despliegues iniciales de 5G y podría estar disponible desde mediados de 2019⁹³. La banda de frecuencias 27,5 - 28,35 GHz tiene escasa utilización en el país. Originalmente fue normada para el servicio LMDS, servicio que no tuvo el desarrollo esperado y carece de asignaciones.

El Plan Nacional Chile 5G prevé que:

- Las concesiones se otorgarán por concurso público, de acuerdo con la Ley General de Telecomunicaciones.
- Los bloques se podrían agrupar en bloques de la banda 3,6 GHz y 28 GHz.
- El servicio podría ser fijo y/o móvil (principio de convergencia).

- Las bandas de frecuencias 3,5 GHz y 28 GHz no impedirán el uso futuro de las bandas de 700, 800, 900, 1.710-1.755 / 2.155-2.190, 1.900 y 2.600 MHz, para servicios 5G.
- En caso de producirse interferencias en bloques adyacentes, debido a que operan en modo TDD, las concesionarias se deberán poner de acuerdo en primera instancia entre ellas. En caso de no llegar a acuerdo, el regulador establecerá las condiciones de operación, tal como sincronización.
- De ser necesario, se podrían establecer condiciones de operación para que las estaciones terrenas puedan coexistir.

En febrero de 2019, el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, a través de Subtel y en el marco del Mobile World Congress (MWC19) anunció que dará inicio al proceso de licitación para 5G, para lo que hará disponibles 60 MHz de espectro a nivel nacional entre las bandas de 700 MHz y 3.500 MHz

Colombia identificó las bandas medias entre 3,3-3,7 GHz para IMT. Algunas de estas frecuencias se encuentran ocupadas, aunque en diciembre de 2019 se liberarán 100 MHz de 3,4-3,5 GHz. La Agencia Nacional del Espectro planea poner a disposición 400 MHz de la banda de 3,5 GHz para 2020. Parte de estas frecuencias están ocupadas por servicios fijos inalámbricos.

En el Plan Nacional de Desarrollo de Telecomunicaciones 2015-2021 se indica a la banda de 3,5 GHz como un espectro habilitado para tecnologías IMT.

En Ecuador, la ARCOTEL publicó consultó en abril de 2018 la canalización del rango 3,3-3,6 GHz con el objetivo de fomentar las IMT- Avanzadas en Ecuador, pero no se ha concursado. La banda 3,3-3,4 GHz no está en uso, según la ARCOTEL, mientras que en 3,4-3,6 GHz se tienen 71,5 MHz concesionados a dos empresas estatales (50 MHz a nivel nacional a CNT y 21,5 MHz regionales para ETAPA en el cantón Cuenca). La propuesta de canalización

contempla derogar resoluciones que dieron estas autorizaciones para poder liberar las bandas.

La propuesta de canalización del segmento 3,3-3,6 GHz sugiere definir las para acceso TDD. La banda 3,3-3,4 GHz sería dividida en 10 bloques de 10 MHz cada uno para un ancho de banda de 100 MHz y la banda 3,4-3,6 GHz se segmentaría en 20 bloques de 10 MHz cada uno para un ancho de banda total de 200 MHz.

Aunque, no se está considerando la banda de 3,5 GHz para servicios móviles dado que está ocupada y activa para servicios fijos inalámbricos punto a multipunto.

En Paraguay, el regulador publicó la resolución directorial 36/2019 en enero de 2019 con la que incluye la banda de 3,5 GHz como banda IMT en el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF). Se atribuyó el segmento 3,4-3,6 GHz al servicio móvil a título primario y se canalizó en 40 bloques de 5 MHz en modalidad FDD.

En febrero de 2018, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) modificó el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF) de Perú al reconocer la escasez de la asignación de espectro radioeléctrico para tecnologías IMT. En consecuencia, surgió la necesidad de la identificación y asignación de nuevas bandas de frecuencias para poder atender la actual y futura demanda creciente de servicios móviles de telecomunicaciones, entre las que se encuentra 3,4-3,6 GHz.

La banda de 3,5 GHz está asignada actualmente a algunos operadores (Entel, Claro, Movistar) y el MTC sometió a consulta recientemente un plan de canalización y para destinarla como banda IMT.

En Uruguay, la banda de 3,4-3,7 GHz tiene asignaciones de servicios fijos inalámbricos punto a multipunto.

4.2.3.7 Bandas de frecuencia 26GHz

La banda de los 26 GHz (24,25 – 27,5 GHz) Es la frecuencia más elevada que nunca antes se haya utilizado en tecnología celular, puede aportar una velocidad muy alta, comparable a la de la FTTH. En contrapartida, su capacidad de penetración de los edificios es muy baja (no atraviesa obstáculos).

La implementación de la 5G se basa en un conjunto de soluciones técnicas, que se instalarán progresivamente. Las antenas móviles 5G utilizarán a medio plazo 3 bandas de frecuencia.

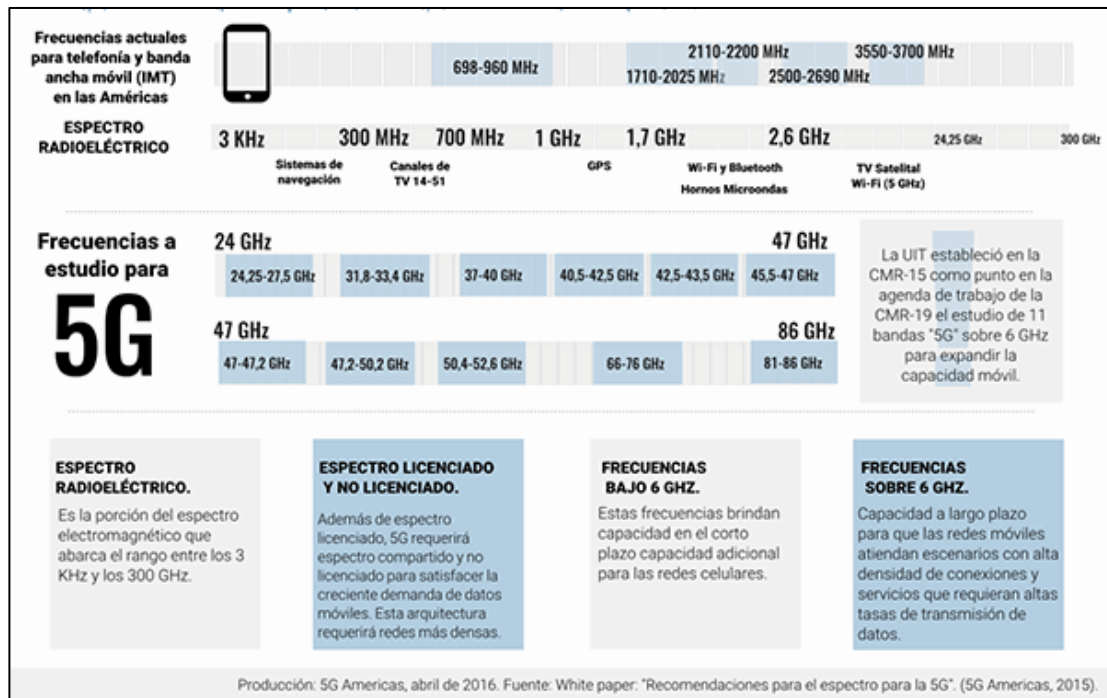


Figura 17. Bandas de frecuencia para las redes 5G

Fuente: 5G Américas

Para alcanzar un desarrollo del mercado 5G a pleno potencial, se debe tratar de liberar el espectro en bandas de cobertura por debajo de 2 GHz, capacidad entre 2-6 GHz, y alta capacidad de 24.25-86 GHz. En total, se debe tener en cuenta la liberación 1,960 MHz de espectro en bandas por debajo de 6 GHz según el Informe UIT-R M.2290 y, adicionalmente, un mínimo de 15 GHz de espectro en bandas en el rango de

24.25-86 GHz de acuerdo con el Informe UIT WP5D, lo que permitiría alcanzar un desarrollo competitivo del mercado 5G.

Es importante la liberación del espectro 5G en bandas para las cuales su ecosistema ya se encuentra en desarrollo a nivel mundial, para lograr mayores economías de escala, interoperabilidad, roaming internacional y fomentar inversiones.

En bandas de cobertura de 600 MHz (3GPP 5G/NR n71) deben tenerse liberadas ya que el ecosistema 5G se encuentra en desarrollo en Norte América (i.e., EE.UU., Canadá, y México). En las bandas de capacidad, se sugiere liberar la banda 3.3-3.8 GHz (3GPP 5G/NR n78), ya que, el ecosistema 5G se está desarrollando para Europa, donde varios países han asignado, o están en proceso de subastar, diferentes rangos de esa banda.

En bandas de alta capacidad, se recomienda liberar las bandas milimétricas de 24.25- 86 GHz, ya que, el estándar UIT-R IMT-2020 (5G) define objetivos de desempeño mucho más exigentes que los estándares anteriores, en cuanto a velocidades (descargas pico > 20 Gbps), latencia (1-4 mseg.) y densidad de conexiones (1 millón por Km²), los cuales, solo es posible lograr mediante la asignación de amplios bloques de espectro contiguos en el orden de 500 a 1000 MHz por operador. Se sugiere considerar la banda de 26.5-29.5 GHz (3GPP 5G/NR n257), también, conocida como 28 GHz, alineado con la tendencia mundial impulsada por países pioneros que ya asignaron están en proceso de asignar dicha banda, tales como, EE.UU. (27.5-28.35 GHz), Corea del Sur (27.5-28.9 GHz) y Japón (27.0-29.5).

Adicionalmente, recomienda la banda 24.25-27.5 GHz (3GPP5G/NR n258), conocida como banda 26 GHz, la cual, se está considerando en Europa, Asia y África. También, se sugiere considerar el bloque de 37-43.5 GHz (3GPP 5G/NR n259 y n260), conocidos como bandas 37/39/42 GHz, los cuales, han sido identificados en EE.UU.

Posteriormente, se recomienda considerar las bandas de espectro que se aprueben en la próxima Conferencia Mundial de Radio CMR-19 de la UIT-R dentro del punto de agenda 1.13. SUBTEL debería autorizar el despliegue de 5G/NR en todas

las bandas existentes, para permitir que los Operadores puedan introducir y expandir la cobertura 5G rápidamente. Se sugiere que las asignaciones de espectro 5G sean tecnológicamente neutrales para dar flexibilidad a los Operadores de adaptarse a evolución de la tecnología y nuevas demandas de mercado. Se sugiere que las licencias de espectro sean a nivel nacional, y que las obligaciones de cobertura de los Concursos Públicos sean consistentes con la naturaleza de propagación de cada rango de espectro.

4.2.4 Características de las bandas del espectro radioeléctrico para 5G

El espectro de banda radioeléctrico puede dividirse aproximadamente en los siguientes tres rangos:

- **Espectro de banda bajo:** hasta 3 GHz
- **Espectro de banda medio:** entre 3 GHz y 6 GHz
- **Espectro de banda alto:** sobre los 6 GHz

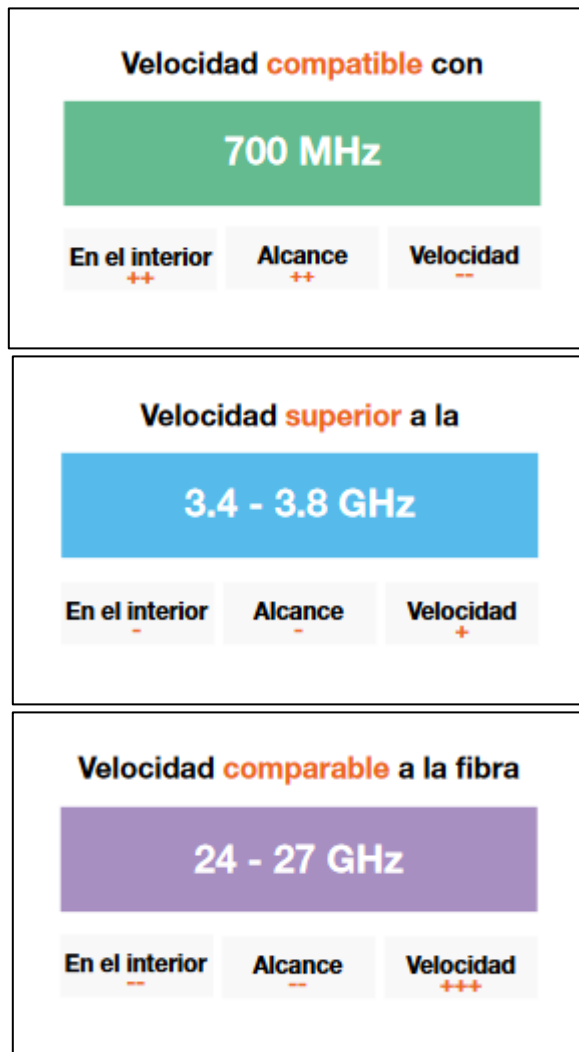


Figura 18. Comparación de velocidades según la frecuencia empleada
Fuente: Orange (2019)

Cada rango de espectro tiene características específicas que lo hacen adecuado para ciertos escenarios de implementación de tecnologías, y algunas bandas serán más adecuadas que otras para ciertos usos.

Las bandas de frecuencias más bajas tienen muy buenas capacidades de propagación que lo hacen factible para una gran cobertura de área. Estas bandas bajas son muy adecuadas para la penetración en interiores. En esta categoría están las bandas de 600 MHz y 700 MHz.

El espectro de bandas medias, en tanto, ofrece un equilibrio de las capacidades del espectro de bandas bajas y altas. Proporciona un tipo de cobertura más factible para el despliegue urbano y en este rango se encuentran las bandas de 2,3 GHz, 2,5 GHz y 3,5 GHz. Las bandas de frecuencias más altas, como las de las ondas milimétricas (mmW), son óptimas para transmisiones de corto alcance, baja latencia y de muy alta capacidad, pero con un alcance más limitado y con poca penetración en interiores. Las bandas altas podrían proporcionar mayor capacidad para las redes móviles por la cantidad de espectro no utilizado disponible en estas frecuencias.

Dependiendo del espectro que se utilice se modificará el número de estaciones base y antenas para cubrir una determinada área. Las implementaciones de banda baja utilizan un número menor de antenas que el espectro medio, y este requerirá menos antenas que las bandas milimétricas.

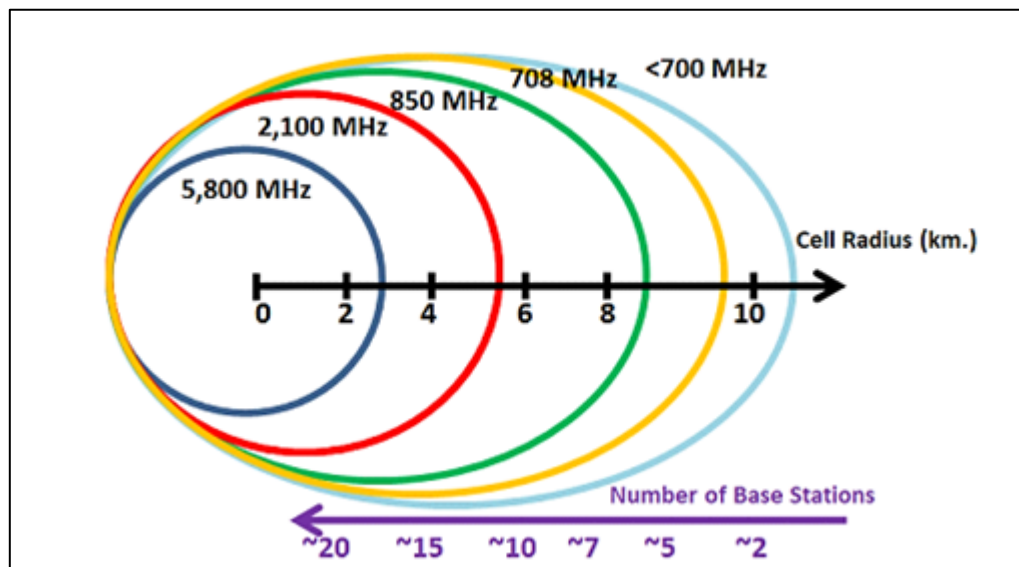


Gráfico 13. Cobertura potencial por tipo de banda
Fuente: SCF Associates (2019)

De acuerdo a lo que detalla el gráfico, las radio bases en la banda de 700 MHz pueden tener cobertura más amplia comparadas con radio bases que utilicen espectro de bandas más altas, como 2,1 GHz. Para el caso de los despliegues en bandas bajas,

esta menor inversión inicial en el despliegue de red es un atractivo para fomentar el uso de servicios de banda ancha móvil en localidades y poblaciones que en la actualidad carecen de acceso. Es decir, la introducción del servicio no generaría grandes volúmenes de tráfico por lo que la demanda se satisfaría plenamente con un gasto de capital bajo. En este sentido, las bandas de 600 MHz y 700 MHz representan una alternativa a futuro a los accesos cableados en áreas suburbanas, donde las redes fijas suelen carecer de cobertura robusta en América Latina. Otra de las características salientes de la banda es la penetración “indoor”, es decir, al interior de edificios y construcciones a diferencia de bandas de mayor densidad. Estudios del SmallCellForum indican que el 50% del tráfico de voz y alrededor del 80% del tráfico de datos móviles se cursa en entornos cerrados (indoor). En este sentido, las bandas bajas, menores a 1.000 MHz tienen una mayor penetración en estos espacios.

En resumen, las bandas de frecuencia más bajas (700 MHz y 850 MHz) permiten una propagación más amplia de las señales y llegada de mejor manera a interiores.

Las bandas altas que se consideran para 5G (26 GHz y 28 GHz) tienen mayor ancho de banda que permitirán mayores velocidades de transmisión de datos, pero cuentan con menor alcance.

Sin estas bandas, la tecnología 5G no será capaz de brindar las velocidades de datos más altas. Es crucial que los gobiernos apoyen el espectro móvil por encima de 24 GHz en la CMR-19 (por ejemplo, de 26 GHz) y que, además, pongan a disposición la banda de 28 GHz donde sea posible. Las bandas de 26 GHz y 28 GHz están teniendo un ímpetu especialmente importante y, como son adyacentes, son compatibles con la armonización del espectro y, por lo tanto, con menor complejidad en teléfonos, economías de escala y disponibilidad temprana de equipos

Las bandas medias como 2,5 GHz o 1,9 GHz aportan una mezcla de esas propiedades y ofrecen un balance a los despliegues de servicios móviles.

Es por ello que las redes 5G necesitarán utilizar espectro bajo, medio y alto para permitir el desarrollo de casos de uso, como el Internet de las Cosas masivo (IoT), para industria y ciudades inteligentes, la banda ancha mejorada con comunicaciones de muy baja latencia. Es deseable que las administraciones nacionales desarrollen políticas de espectro que fomenten el acceso a espectro en todos estos rangos.

Como se señaló anteriormente, en América Latina todavía hay países que no han asignado la totalidad o parte de bandas como AWS (1,7/2,1 GHz) o 2,5 GHz que ya tienen amplios ecosistemas de equipos. Por ejemplo, ocho mercados aun no asignan la banda 2,5 GHz a pesar de que es una de la que tiene una de las mayores diversidades de equipos LTE compatibles. Asignar capacidad en bandas en uso 1,9 GHz o AWS (en los países en los que se adoptó) y 2,5 GHz es importante para impulsar el desarrollo de servicios móviles en el corto plazo.

Las bandas de 2,3 GHz y 3,5 GHz deben incluirse entre las bandas de espectro medio. La banda de 2,3 GHz es considerada por la mayoría de los países de Latinoamérica como más espectro para banda ancha móvil, pero pocos países (Brasil y Perú) han anunciado licitaciones. La banda de 3,5 GHz tiene potencial para ser una banda pionera de 5G en la región, pero en algunos países puede ser necesario reorganizarla parcialmente, debido a asignaciones que se hicieron anteriormente para otro tipo de servicios fijos.

4.3 FASE III: Diseñar el modelo de propagación Okumura-Hata para las redes 5G

En esta fase que se presenta a continuación, se procedió a tomar la información proporcionada por el modelo para brindar una propuesta de adaptación para su uso en Venezuela, específicamente a una radio base ubicada en el Municipio San Diego del estado Carabobo; en tal sentido, para una planificación y diseño eficiente de la red, particularmente para la

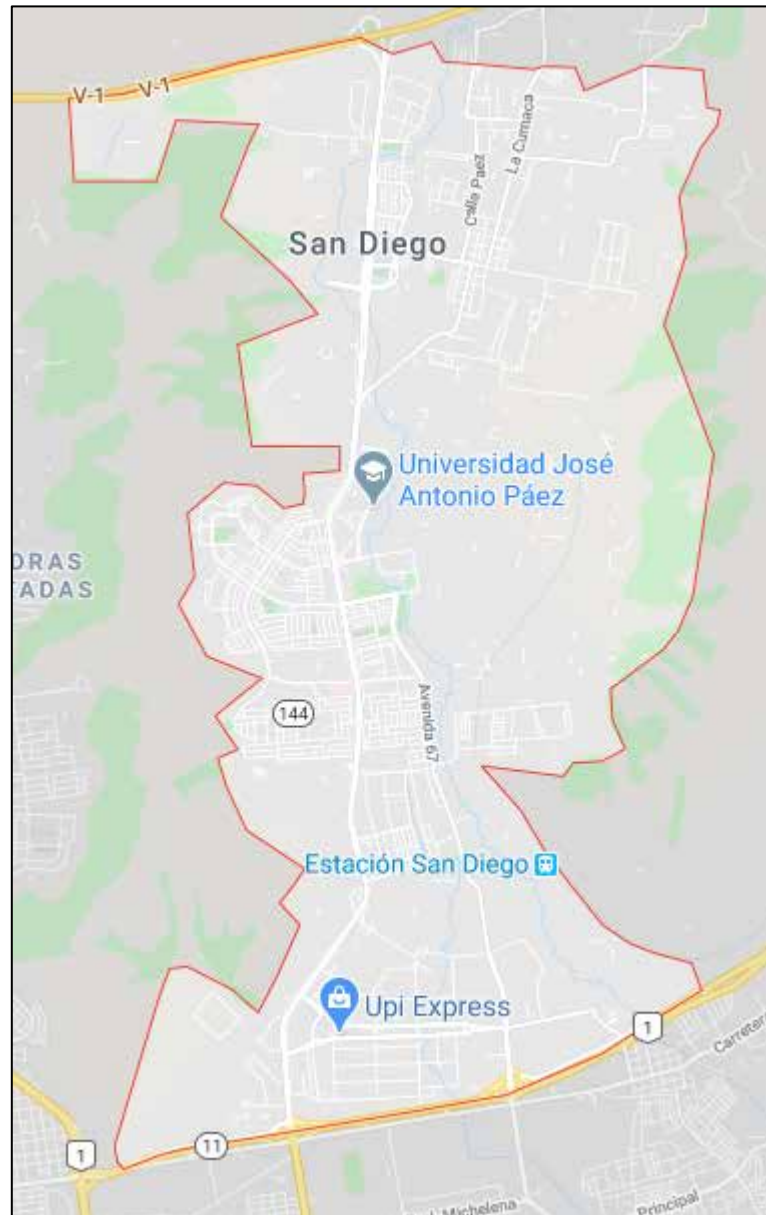


Figura 19. Municipio San Diego del estado Carabobo

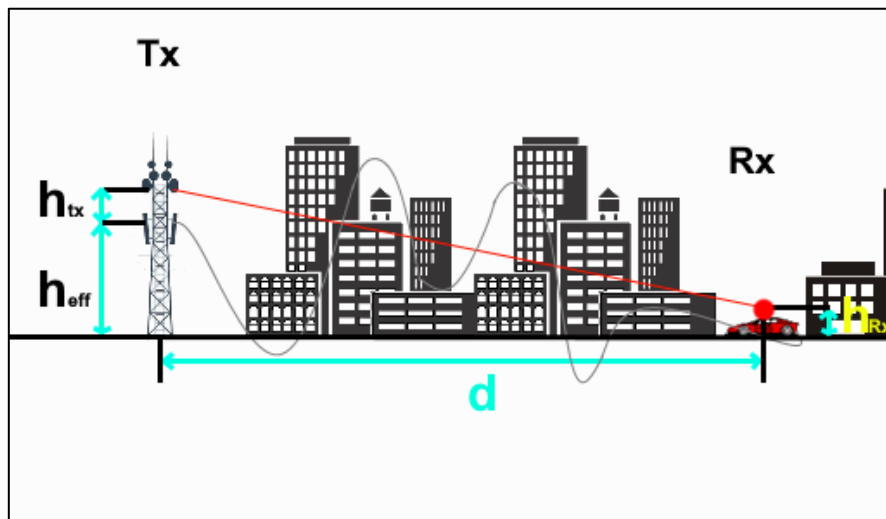
Fuente: Google Maps

implementación inicial de la red inalámbrica 5G, los modelos de propagación de radio son muy importantes, ya que describen el comportamiento de la señal mientras está

transmitido desde la antena del transmisor (Tx) a la antena del receptor (Rx) y la dependencia de la intensidad de la señal en muchos parámetros.

En particular, modelos empíricos que se basan en medidas, caracterizan la propagación de la onda en términos de distancia entre antena transmisora (Tx) y receptora (Rx), frecuencia de operación, altura de antena, edificio alturas, etc. Estos modelos empíricos de propagación ayudan a encontrar la red importante parámetros, como pérdida de ruta y cobertura de radiofrecuencia (RF). En el parámetro, la pérdida de ruta es útil. para encontrar la distancia de cobertura de RF y debe estimarse para un entorno de despliegue. Usando el punto de referencia de señal Rx.

La pérdida de ruta es la atenuación en la intensidad de la señal a medida que se propaga de Tx a Rx y dicta el área de cobertura de RF para la implementación del sistema.



Grafica 12. Comportamiento de la señal mientras está transmitido desde la antena del transmisor (Tx) a la antena del receptor (Rx)

Fuente: Propia (2019)

Los modelos de pérdida de ruta importantes incluyen el Modelo Okumura Hata, dicha pérdida existente en el enlace puede ser obtenidas

por medio de la ecuación siguiente, en que se ha incluido el factor de corrección suburbano:

$$L_{p,sub} = L_{p,open} + 10 \log_{10} \left(\frac{f}{3000} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{h_t}{1.5} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{h_r}{1.5} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{d}{0.3} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{f}{3000} \right)$$

donde:

- : Pérdidas por propagación al 50% de recepción de señal.
- : Frecuencia portadora en MHz.
- : Altura efectiva de la antena transmisora en metros.
- : Altura efectiva de la antena receptora en metros.
- : Distancia entre el transmisor y el receptor en km.

Para la demostración llevada a cabo, se empleó la operadora Digitel, así como la frecuencia portadora en el enlace de bajada o descarga (downlink) de una banda hipotética la cual será 8GHz para Digitel.

En el caso de la antena, se asumió el uso del modelo ANT1738D17P-XP, con una potencia de transmisión típica de $50W = 107,75dBm$.

· **Lanbowan ANT1738D17P-XP**

- Ganancia (dBi) @ 1700GHz= 15
- Ganancia (dBi) @ 3800GHz= 17

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

Se aprecia que la empresa Digitel cuenta con 8 BTS, cubriendo el municipio San Diego.

Nombre de Sector	Nombre BTS	Sector	Latitud	Longitud
BIGLOW21	BIGLOW1	1	10.1925361111111	-67.9626361111111
BIGLOW22	BIGLOW1	2	10.1925361111111	-67.9626361111111
BIGLOW23	BIGLOW1	3	10.1925361111111	-67.9626361111111

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 --: Ubicación de las radios bases empleadas por Digitel en San Diego.

En la siguiente figura se aprecian tres de las BTS más cercanas a la Universidad José Antonio Páez.



Figura 20. Ubicación de las radios bases de Digitel más cercanas a la UJAP
Fuente: Google Maps (2019)

$$\begin{aligned} () &= (1,1 \log(\quad) + (1,56 \log(\quad) \\ () &= [1,1 \log(1800000 \quad) + 1,56 \log(1800000 \quad) \\ () &= 1,49 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} () &= 69,55 + 26,16 \log(1800000 \quad) \\ () &= 139,83 \end{aligned}$$

Luego, para el balance de potencia:

$$\begin{aligned} () &= () + () \\ () &= 107 + 15 \cdot 139,83 \\ () &= 78,53 \end{aligned}$$

Siendo el factor de difracción = 1

Recordando que:

- = *perdidas de trayectoria*
- = factor de corrección de altura de antena
- = *frecuencia*
- = *distancia*
- = *altura BS (radio base)*
- = *altura MS (antena móvil)*

4.4 FASE IV: Factibilidad económico, social y ambiental

Dentro de la propuesta del presente proyecto, se define claramente el proceso de implementación de la tecnología 5G en Venezuela, específicamente en las zonas con antenas y equipos para realizar la transición.

A continuación, se describen los parámetros operacionales, técnicos, legales y económicos pertinentes al caso de estudio.

4.4.1 Factibilidad Económica

Al ser un proyecto de afectación masiva por el uso generalizado de los dispositivos a nivel nacional, tanto el estado como las empresas privadas tienen previsto ya en miras de lo que viene, planes económicos y técnicos para desplegar la red 5G en las zonas más importantes de las principales ciudades del país. Esto tiene un gran beneficio económico ya que atraerá inversiones que dependan de la integración de otros aplicativos a la red celular como se la conoce hasta el momento.

Entre los inconvenientes económicos que tendría el despliegue de 5G sería principalmente el alto coste de la infraestructura. En los países desarrollados podrían costearse este despliegue apoyado por las empresas tecnológicas y por sus gobiernos, pero los países en vías de desarrollo como Venezuela se tendrían grandes dificultades para alcanzar los recursos suficientes para poder costearse el alto coste del despliegue de infraestructura cuando ya que en algunas partes del territorio nacional aún no tienen ni siquiera una conexión a internet estable llegando a no superar los 20 Mbps en bajada.

4.4.2 Factibilidad Operacional

En lo que respecta a la factibilidad operacional a nivel general en el país se tiene el apoyo suficiente de las entidades gubernamentales y empresas públicas y privadas de telecomunicaciones para el desarrollo de nuevas tecnologías de comunicación inalámbrica como lo es la telefonía móvil y junto con esto la aceptación de los usuarios en general ya que están siempre buscando

mejorar sus conexiones vía móvil y poder integrar más funcionalidades a sus teléfonos celulares.

4.4.3 Factibilidad Técnica

Como ya se indicó anteriormente, la tecnología 5G está en etapa de desarrollo y pruebas, se estudian los alcances y se prueban ambientes controlados para simular el entorno 5G, aunque es importante resaltar que esta tecnología es altamente factible en el territorio nacional realizando los ajustes necesarios en materia de infraestructura e inversión para las empresas Movistar y Digita, en cuanto a Movilnet el mismo no es factible ya que esta empresa no posee en la actualidad la tecnología 4G y la misma operará en la misma banda que Movistar, lo que hace que sus inversiones para la implementación de tecnología 5G sean aún mayor.

Cabe destacar que el país recibió su primera red de 4G en 2013 y en menos de dos años un solo operador ofrecía cobertura a más del 60% de la población.

Según cifras de finales de 2018 de CONATEL, apenas el 10,65% de las líneas móviles del país son 4G. Un atraso increíble al compararse con todos los países de la región.

Tomando como premisa lo antes expuesto, se plantea el desarrollo de estudios técnicos correspondiente al proyecto investigativo de esta nueva tecnología, para así lograr los avances en esta materia lo antes posible.

Adicionalmente, se debe tener presente que la infraestructura de red 5G proveerá soluciones dedicadas al soporte de mercados verticales como el energético, alimenticio, agrícola, de la salud, etc.

Hasta el momento, las tecnologías móviles 2G, 3G, 3.5G, 4G e incluso 4.5G a nivel nacional, mantienen un esquema en donde para cada operador (Movilnet, Movistar y Digitel) se manejan redes únicas en donde cualquier equipo que se enganche a la red mantendrá un slot dentro de la red, pero no todos los dispositivos requieren velocidades altas o están transfiriendo información

constantemente por lo que esto causa una mala utilización de los recursos de la red.

Con el Network Slicing (Particionamiento de red) se realizará una división, similar a subredes, pero con la particularidad que cada subred tiene un propósito específico, con esto se lograría una mejor adaptación de las necesidades de cada dispositivo conectado.

Se debe tomar en cuenta que este método de utilización de las redes de telefonía móvil es una arquitectura de red virtual que usa los mismos principios de SDN (Software Design Networking – Redes de diseño de software) y NFV (Network Functions Virtualization – Virtualización de funciones de red) en redes fijas. Tanto SDN como NFV proporcionan gran flexibilidad en la red ya que permiten particionar las arquitecturas de red convencionales en elementos virtuales que pueden ser enlazados mediante software. Se tienen diferentes arquitecturas y topologías prototipo para lo que se espera se implemente con 5G.

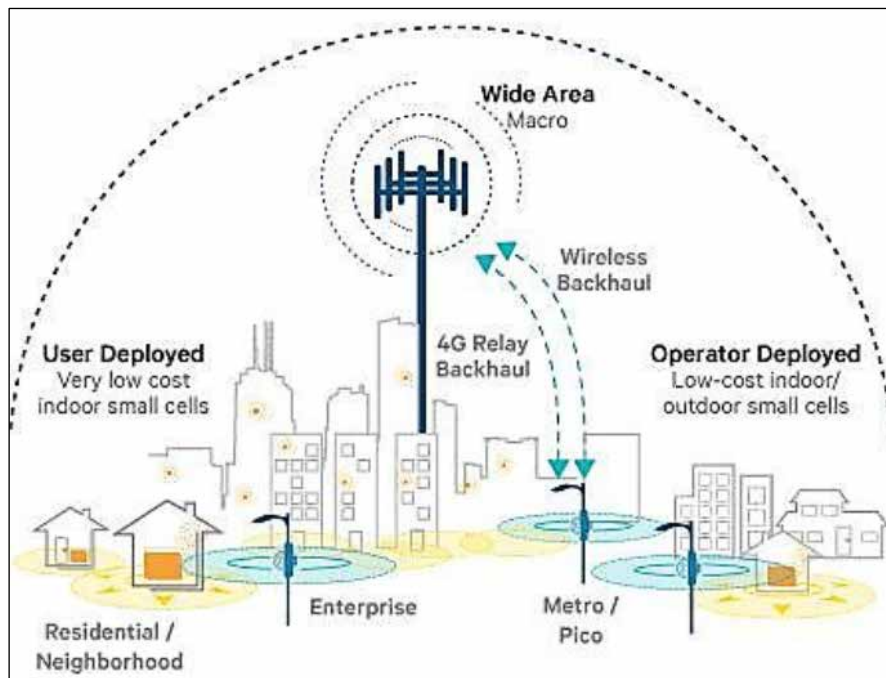


Gráfico 14. Esquema de funcionamiento de la tecnología Small Cells para 5G.

Fuente: QUALCOM (2017)

Se puede observar en el gráfico expuesto las “small cells” en la red de acceso fijo la cual se conecta mediante enlace de radio con la red principal.

Dentro de lo indicado, se manejan enlaces fijos como enlaces de fibra óptica de plástico, enlaces coaxiales y fibras dedicadas, enlaces microondas, ondas milimétricas e incluso tecnología backhaul (red de retorno o porción de una red jerárquica que tiene enlaces intermedios entre backbone o núcleo y las subredes de borde).

4.4.4 Factibilidad Legal

El proceso en materia legal (asignación de frecuencias por parte de CONATEL) aún se encuentra en análisis, pero ya está incluido en el plan nacional de frecuencias, en donde se describen los rangos de frecuencias y la penetración del uso del espectro en esos rangos en la actualidad. En base a esto, se puede prever que cuando se realice la oficialización por la ITU de la banda de frecuencia y el ancho de banda asignado a 5G se podrá así mismo hacer oficial y decretar los estatutos legales correspondientes para dichas bandas en el país.

4.4.5 Factibilidad Medioambiental

Es posible pensar que las comunicaciones móviles no generan ningún tipo de efecto negativo medioambiental por tratarse de elementos sin un enlace físico necesario para su posible comunicación, pero detrás de estos dispositivos está el uso ineficiente de la energía y los métodos de reciclaje después de su vida útil que generan grandes desechos tecnológicos, que su mal tratamiento puede contaminar y ser perjudicial para la salud.

Hay organismos que consideran que el recurso del espectro electromagnético se ve contaminado cuando se produce un uso excesivo de él a través de la gran cantidad de frecuencias emitiendo a la vez en un lugar concreto.

Para el desarrollo de 5G la eficiencia espectral es uno de los retos a conseguir por lo que, aunque habría una gran cantidad de ondas electromagnéticas fluyendo en el medio libre, sólo se utilizarían para la transmisión deseada evitando perder potencia cuando su uso es innecesario, por lo que liberaría el uso del espectro electromagnético haciendo un uso más eficiente del espacio donde se propaga y del espectro.

Otro aspecto de vital importancia para 5G es que, tras el aumento exponencial de dispositivos con la tecnología de MIMO Masivo, al terminar el ciclo de vida de los dispositivos no se reciclen correctamente generando lo que se denomina la basura electrónica o e-waste.

La basura electrónica es un hecho hoy en día y supone una contaminación muy negativa hacia el medioambiente, siendo también perjudicial para el ser humano por los gases que expulsa al desmantelar los componentes electrónicos que contienen materiales que en cantidad se vuelven tóxicos.

Es importante destacar que el consumo de energía aumentara significativamente, esto motivado principalmente al uso de los dispositivos de transmisión y recepción como lo son los routers y el desarrollo de 5G, generando también un aumento significativo de las infraestructuras, incluyendo estaciones base transmisoras y distintos tipos de M2M. Es por ello por lo que se debe de prestar especial atención al uso energético, y más aún en la situación actual de nuestro país donde se presentan deficiencias significativas en este sector, ya que el incremento de conexiones demandará un uso más intensivo de la energía.

Se vuelve, por lo tanto, necesario el uso de energías renovables y la búsqueda de baterías más eficientes y potentes cuyos componentes reduzcan el consumo de energía o lo gestionen de forma eficiente.

4.4.6 Factibilidad Social

El impacto social directo será el abaratamiento de las tarifas de conexión a internet, incluso su uso gratuito en otros productos domésticos de IoT que requieren

conexión a internet, proporcionando un acceso a internet al alcance de la mayoría de la sociedad.

Con el 5G se mejorará la experiencia del usuario en todos los aspectos de comunicación, transporte, sociabilidad y productividad, permitiendo un desarrollo de dispositivos, sensores y productos de todo tipo con conectividad a internet. Se estima que la tecnología de la quinta generación 5G a nivel mundial creará 22 millones de trabajos y se producirán hasta 12,3 mil millones de servicios y productos para el año 2035 teniendo un impacto positivo en multitud de aplicaciones como en la educación, transporte, seguridad y entretenimiento.

El exceso de productos de quinta generación que se estima que existirán y formarán parte de nuestro día a día será mucho mayor que en la actualidad como se ha visto previamente por lo que la sociedad se puede enfrentar a problemas que hasta ahora no han existido. Un problema social de especial relevancia que provoca preocupación en gran parte de la sociedad es la hiperconectividad y la adicción que puede crear.

Además de la hiperconectividad surgen problemas éticos sobre el uso de ciertas tecnologías derivadas de 5G a futuro, como lo son los coches autónomos que son programados para evitar accidentes de la manera más objetiva posible sin tener en cuenta situaciones de la vida real que un humano realizaría de manera subjetiva, por lo que surge un problema de ética a resolver por profesionales de todos los ámbitos, no solo del ámbito tecnológico, lo que se convierte en un reto social y económico muy desafiante.

CONCLUSION

En los primeros capítulos se hizo referencia a la importancia que tienen los modelos de propagación dentro de los sistemas de comunicaciones móviles y como cada vez que surge una nueva tecnología en este ámbito como el 5G, se hace necesario modelar el canal de propagación, así como estudiar el modelo de propagación que permitan obtener resultados precisos en cualquier escenario.

Posteriormente se estudió el comportamiento del modelo Okumura-Hata como canal y la predicción de pérdidas con el objetivo de una mejora continua de esta herramienta fusionada a el desarrollo de la siguiente generación 5G, que se espera que esté operativa en este 2020 como futura tecnología.

A lo largo de este trabajo, se ha intentado hacer una recopilación exhaustiva del modelo Okumura-Hata ya existente y empleado en redes 4G y comparar su factibilidad en las redes 5G para ver cómo se comportamiento y análisis para predecir las pérdidas del trayecto en distintos escenarios.

Es importante destacar que durante el trabajo realizado en cuanto a la parte de 5G, como todavía se encuentra en fase de investigación, se extrajo información sobre las futuras bandas que se están estudiando, así como las características que deberá cumplir el nuevo modelo de canal.

Hoy en día los modelos de propagación están implementados en potentes herramientas software que permiten planificar sistemas de comunicaciones móviles mediante el empleo de mapas del terreno. A consecuencia de esto, tanto el desarrollo del modelo se puede encontrar condicionados por limitaciones como el uso de memoria o el tiempo de cálculo necesario.

En el caso de los estudios que se están realizando sobre modelos de propagación para 5G, la no excesiva complejidad de los nuevos sistemas es un requisito fundamental que ha de tenerse en cuenta.

Por lo tanto, la línea de trabajo futura sobre este tema irá enfocada a conjugar de manera eficiente la inclusión de nuevas tecnologías cada vez más complejas en las comunicaciones móviles, junto con el desarrollo de modelos de propagación que puedan ser implementados también en ordenadores sin sobrecargarlos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Android Venezuela. (2019).
[Documento en línea]. Disponible:
<https://www.androidvenezuela.com/android/conoce-las-bandas-de-las-operadoras-venezolanas>
- Arias, Fidias (2006).
(5ta Edición) Caracas-Venezuela: Episteme.
- Corbetta (2007).
[Documento en línea]. Disponible: <http://bit.ly/2IfOuvI>
- Dieter, C. [Documento en
línea]. Disponible:
<http://www.winlab.rutgers.edu/~andrej/research/docs/cost231/ch4.pdf>
- Digitel C.A. (2019). [Documento en línea]. Disponible:
<http://www.digitel.com.ve/digitelenelmapa/>
- Ericsson. (2012). [Documento en línea].
Disponible: <https://kk.org/extrapolations/mobile-data-vs-voice-usage/>
- Garcia, R. (2016).
[Documento en línea]. Disponible:
[http://oa.upm.es/44152/1/TFG_FRANCISCO_JAVIER_GARCIA_RUE
DA.pdf](http://oa.upm.es/44152/1/TFG_FRANCISCO_JAVIER_GARCIA_RUE_DA.pdf)
- Hernández, R. (2014), (5ta edición)
[Documento en línea]. Disponible: <http://bit.ly/1SgDw7f>
- Herradón, R. (2008) . 1ª ed. Madrid-España.
- Hurtado, J (2000). . Caracas–Venezuela: Sypal.
- Hurtado, J. (2007). Metodología de la
Investigación Holística. Caracas-Venezuela: Quirón.

Ludditus. (2016).

[Documento en línea]. Disponible:
<https://ludditus.com/2016/09/07/4g-is-meant-to-kill-the-last-trace-of-common-sense/>

Sabino, C. (2002).

Caracas-Venezuela: Panapo.

Quintana, R (2013).

[Documento en línea]. Disponible:
http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59282013000100002&script=sci_abstract

Quotient Associates.

[Documento en línea].
Disponible:<http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/above-6ghz/qa-report.pdf>

UJAP. (2007).

Valencia, Venezuela.