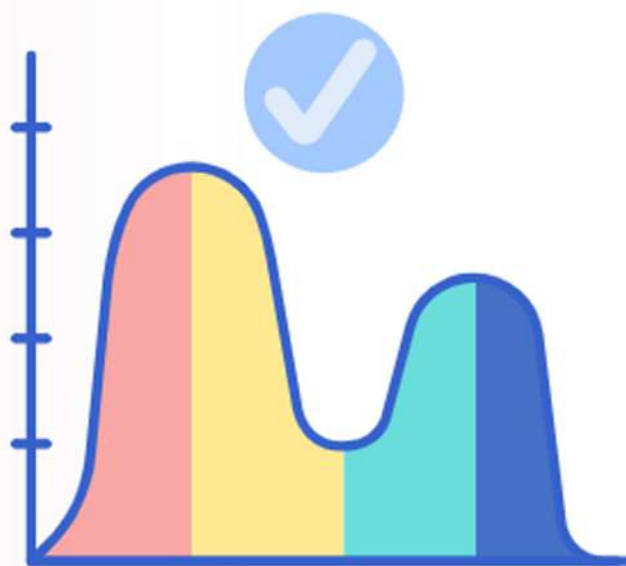




Formando **líderes** para la  
construcción de un nuevo  
**país en paz**

# METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DEL ESPECTRO CON TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA OBTENER MODELOS DE PROPAGACIÓN



ISBN: 978-958-53581-0-2

# **METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DEL ESPECTRO CON TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA OBTENER MODELOS DE PROPAGACIÓN**

**@ 2020 copyright**

Editorial Universidad de Pamplona

Lugar: Universidad de Pamplona

Km 1 Vía Bucaramanga Ciudad Universitaria

Pamplona – Norte de Santander- Colombia

Fuente icono: [https://www.flaticon.es/icono-gratis/amplio-espectro\\_2037152](https://www.flaticon.es/icono-gratis/amplio-espectro_2037152)

Primera edición.

*Jorge Enrique Herrera Rubio*

## AGRADECIMIENTOS

Este esfuerzo intelectual se lo dedico a mi familia, a mis queridos padres María y Jorge, a mi esposa Carmen, y mis grandiosos hijos Anielska y Naim por quienes he podido cumplir todos mis sueños, también a quienes han compartido experiencias en el área de la Radiocomunicaciones y temas de investigación. También a los estudiantes que colaboraron en las prácticas piloto.

Con mucho amor para todos.

Agradecerle a la Universidad de Pamplona por la oportunidad que he tenido de pertenecer a la Facultad de Arquitectura e Ingenierías y poder coadyuvar en el desarrollo de las actividades curriculares, académicas, de docencia e investigación, aportando mi experiencia personal y profesional.

## PREFACIO

El despliegue, mantenimiento e implementación de las infraestructuras en sistemas de telecomunicaciones modernas son complejas de administrar y gestionar cuando se tienen en cuenta factores como: las condiciones geográficas, las políticas de reglamentación, la rápida convergencia de las redes, nuevas tendencias en tecnologías, el requerimiento de nuevos servicios de por parte de los usuarios y las condiciones comerciales de los proveedores y operadores; todo esto genera grandes expectativas para que exista disponibilidad de servicios que garanticen y satisfagan la calidad de las comunicaciones en condiciones de competencia equilibrada para generar un desarrollo social.

Dichas consideraciones hacen parte de los conocimientos que debe tener presente el ingeniero de telecomunicaciones al momento de formular, planificar, implementar y optimizar proyectos de sistemas de radio comunicaciones, además de comprender los efectos espaciales y temporales que sufre una señal de radio frecuencia en el terreno de trabajo, en condiciones de entorno no controladas; para tal fin, es importante estudiar el efecto que dichos sistemas de radio tienen sobre los diferentes tipos de comunicaciones haciendo uso adecuado de los recursos de hardware y de software, de manera que sea posible interpretar el efecto de los mecanismos de propagación en los diferentes ambientes y utilizar algunas técnicas para mejorar el rendimiento de los enlaces de radiocomunicaciones.

Existen las normativas emitidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R) que recomienda métodos analíticos para calcular los niveles de potencia y otros parámetros cuando se implementan sistemas de radio eléctricos en entornos donde las

condiciones ambientales, físicas y estructurales cambian de forma permanente, para mejorar los diferentes tipos de servicios en telecomunicaciones. Sin embargo, con el uso de técnicas experimentales, metodologías particulares y el uso de aplicaciones de hardware y de software modernos es factible desarrollar modelos experimentales matemáticos para analiza el comportamiento dela intensidad de potencia y factores tanto eléctricos como ambientales, que afectan la cobertura delos servicios inalámbricos terrestres.

## Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN.....	9
CAPÍTULO 1.....	12
SISTEMAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS .....	12
1.2 Estimación de parámetros con pruebas estadísticas.....	18
1.3 Aspectos de la planificación de un sistema de radiocomunicaciones.....	19
1.3.1 Planificar el sistema de radio.....	19
1.3.2. Evaluar la interferencia y gestionar el espectro. ....	22
1.3.3 Comparar las mediciones y hacer predicciones.....	24
CAPÍTULO 2.....	30
SÍNTESIS DE LOS PROTOTIPOS DE PROPAGACIÓN.....	30
2.1. Modelos de predicción de acuerdo a la técnica de análisis y construcción. ....	35
2.2. Modelos de propagación para sistemas inalámbricos según el tipo de ambiente .....	39
2.2.1. Modelo Teórico basado en las ondas electromagnéticas .....	40
2.2.2. Modelo de transmisión en el espacio libre, ecuación de Friis .....	43
2.2.3. Modelo de dos rayos .....	48
2.2.4. Modelo Longley-Rice.....	51
2.2.5. Modelo de Durkin .....	53
2.2.6. Modelo Okumura Hata .....	56
2.2.7. Modelo Walfish-Bertoni .....	72
2.2.8. Modelo Ikegami .....	74

<b>Metodología de medición del espectro con técnicas experimentales para obtener modelos de propagación.</b>	<b>7</b>
2.2.9. Modelo Walfisch-Ikegami .....	76
2.2.10. Modelo Cost-231 o Cost-231 Hata .....	78
2.2.11. Modelo COST 231–Walfish–Ikegami .....	81
2.2.12. Modelos ITU-R .....	85
2.2.13. Modelo Erceg C o SUI.....	88
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>93</b>
<b>SISTEMAS DE MEDICIÓN DEL ESPECTRO RADIOLECTRICO .....</b>	<b>93</b>
3.1. Observaciones sobre las mediciones.....	96
3.2. Estimaciones generales sobre la medición de la densidad de flujo de potencia y la intensidad de campo eléctrico.....	98
3.3. Métodos de medida .....	102
3.4. Programas de software .....	105
<b>METODOLOGÍA DE DISEÑO EXPERIMENTAL: MODELO DE PROPAGACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE POTENCIA DEL ESPECTRO.....</b>	<b>110</b>
4.1. Estudio de las metodologías existentes de medición.....	111
4.1.1 <i>Procedimiento mediante el uso de un analizador de espectro.....</i>	112
4.1.2. Los instrumentos dedicados solamente para UMTS/GSM .....	113
4.1.3. Drive Test o recorrido de pruebas .....	114
4.2. Análisis de los diferentes modelos de propagación .....	117
II. Segunda etapa de la investigación: Construcción del modelo metodológico ...	117
4.3. Desarrollo de la metodología experimental.....	118
4.3.1. Plantear el problema .....	120



4.3.2. Revisión teórica .....	121
4.3.3. Generar una hipótesis .....	121
4.3.4. Organización del diseño experimental .....	122
4.3.5. Observaciones y análisis.....	124
4.3.6. Formulación analítica .....	129
III. Tercera etapa de la investigación: Aplicación de la metodología en el diseño de un modelo de propagación experimental .....	131
4.4. Evaluación de los resultados contrastando con los diferentes modelos de propagación existentes .....	131
CAPÍTULO 5.....	137
5. EJEMPLOS PRÁCTICOS.....	137
5.1. Guía práctica 1: Medidas de intensidad de campo para un ambiente interior para celdas WiFi .....	137
5.2. Guía práctica 2: Medidas de intensidad de campo para un ambiente exterior (Outdoor) para celdas móviles 3G/4G/LTE.....	144
5.3. Resultados esperados en la práctica de campo. ....	150
CONCLUSIONES .....	151
RECOMENDACIONES.....	153
REFERENCIAS BIOGRÁFICAS.....	154

## INTRODUCCIÓN

La intención de este documento es presentar a los ingenieros en formación, personal técnico y de ingeniería encargados de la planeación y mantenimiento de redes, la posibilidad de ejecutar el proceso de medición del espectro con herramientas básicas de hardware y software para facilitar el trabajo en campo.

Es importante tener presente que muchos de los contenidos estudiados en la investigación se basan en las recomendaciones UIT-R en donde se especifican cuales son: los procesos, características y parámetros que se deben estimar para un correcto estudio en la propagación de las ondas radioeléctricas a través de los diferentes medios físicos y ambientes de propagación que se necesitan de la correcta gestión y administración del espectro radioeléctrico.

En el Capítulo 1 se abordan en términos generales los aspectos básicos de los sistemas de comunicaciones inalámbricas a manera de resumen; se describen los detalles generales de los modelos de predicción y la estimación de pruebas experimentales.

El contenido del Capítulo 2 describe los modelos de propagación de acuerdo a la técnica de análisis y construcción, como también los tipos de sistemas fijo y móviles que son utilizados en los estudio de caracterización de los ambientes tanto interiores como exteriores; destacando los de mayor utilidad al momento de seleccionar los tipos de ambientes de trabajo. Se resaltan los conceptos determinísticos relativos a las ondas electromagnéticas: refracción, difracción y propagación, entre otros; con la familiarización de diferentes trayectos múltiples de acuerdo a cada una de las diferentes teorías y modelos investigados.

El Capítulo 3 contiene la descripción de los sistemas y métodos de medición del espectro, algunas observaciones de rigor para realizar las medidas y toma de muestras, también las estimaciones generales sobre medición de la intensidad de campo y la densidad de flujo de potencia.

En el Capítulo 4 se explica la metodología de diseño experimental con sus respectivas etapas utilizadas para la construcción de un modelo de propagación por medio de mediciones en campo y todo el proceso de análisis de la información hasta la obtención de la formulación matemática.

En el Capítulo 5 se abordan dos ejemplos prácticos con sus respectivas guías de trabajo para la medición en ambientes interiores y exteriores.



# **CAPÍTULO 1**

## **SISTEMAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS**

## CAPÍTULO 1

### SISTEMAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

El surgimiento de nuevas tecnologías de comunicaciones inalámbricas ha permitido el crecimiento de los servicios de datos hasta el punto que las arquitecturas de interconexión de los sistemas de redes y dispositivos permiten la convivencia y convergencia a gran escala, todo esto es posible gracias a las estructuras de capas de red en donde se integra la parte de Hardware y Software.

Lo anterior, ha permitido que los sistemas de comunicación inalámbrica puedan ser estudiados, analizados y desarrollos desde el entorno de funcionamiento de la capa física y en especial en el control de acceso al medio (MAC), que son las encargadas de coordinar la transmisión y recepción de bit y tramas. En las última década los sistemas de comunicaciones inalámbricos han desplegado dos tecnologías que han permitido mejorar el rendimiento, la capacidad y la velocidad de transmisión los datos; como es el caso del acceso múltiple por división de código (CDMA) para comunicaciones en Banda Ancha y la forma especial de transmisión de Banda Estrecha conocida como multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) que se han adoptado en general en los sistemas de comunicación inalámbricos.

En la figura 1, se observa un diagrama de bloques básico de un sistema de radio digital que describe los componentes y su funcionamiento.

Considerando que la información a transmitir es digital como la fuente de información inicial ésta entra como flujos de datos binarios 1s y 0s, que pasa a un codificador fuente quien

es el encargado de realizar la detección y corrección de errores que se producen implícitamente en el canal.

La codificación del canal, que procede de forma completamente diferente a la codificación de la fuente, se encarga de modificar los bits adicionales para proteger la información de los errores causados por el canal realizando los ajustes correspondientes.

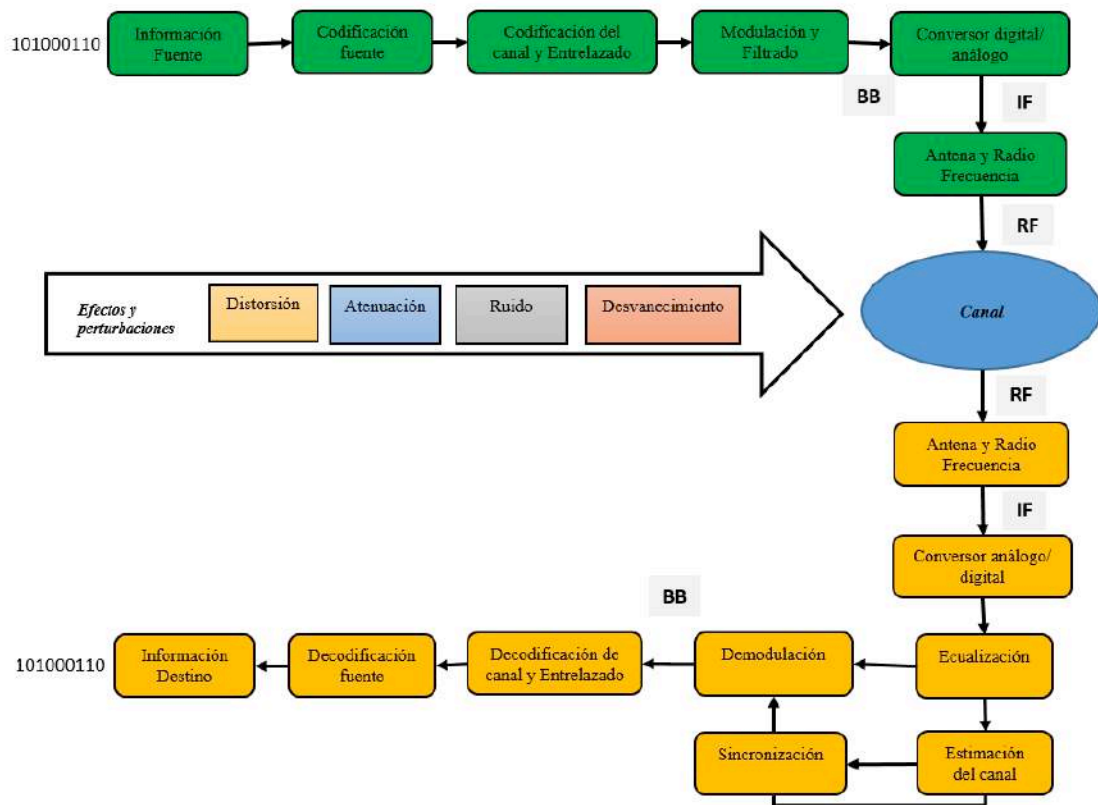


Figura 1: Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones inalámbrico digital.

Fuente: Elaboración propia

Para mejorar la aleatoriedad de los errores y la protección de la información, la codificación del canal suele trabajar con interpolaciones por medio de algoritmos matemáticos. En este caso, los bits se modulan digitalmente de forma adecuada, que suele realizarse mediante el mapeo de bits por medio de la constelación, siendo ésta la encargada de la representación de amplitud y la fase de los símbolos digitales recibidos en función del tiempo del tipo de modulación y que dependiendo del tipo de modulación se ajusta a los problemas del canal.

Después de un filtrado adecuado la señal se convierte de análogo a digital para adaptar la forma de onda con la señalización de banda base (BB) que se mezcla a través de un procesamiento de los amplificadores de frecuencia intermedia (IF) y que luego pasa a la etapa de amplificación de radiofrecuencia (RF) antes de la transmisión por el circuito de la antena transmisora.

Cuando la señal modulada viaja en el espacio libre en el canal inalámbrico inevitablemente se introducen muchos efectos indeseables, incluido el ruido electrónico incorporado, atenuación, ruido externo, la distorsión (no lineal), el desvanecimiento por trayectos múltiples y otras degradaciones.

En la sección de recepción, la antena receptora pasa la forma de onda de entrada a través del bloque de conversión de RF a IF y un convertidor análogo a digital traduce la forma de onda a muestras digitales en sistemas de comunicación inalámbrica digital con técnicas de última generación.

Después, se realiza la operación contraria, para tal caso se procede a la sincronización para poder recuperar: la frecuencia y las fases correctas. Con el fin de superar los efectos de

canal que interrumpen la comunicación confiable, generalmente se adopta la ecualización de la distorsión de los canales. Finalmente se realiza la decodificación del canal y se recibe la señal fuente en el destino.

Para el diseño de un sistema más confiable y una posible señalización piloto, se utiliza el procesamiento digital de señales con técnicas modernas y algoritmos matemáticos para mejorar la estimación de canal en los diferentes sistemas de radio digitales.

Para resumir, en la capa física de las redes inalámbricas en los sistemas de comunicaciones digitales inalámbricas se trata de lidiar con el ruido y las degradaciones de los canales (distorsiones no lineales por canal, desvanecimiento, velocidad, etc.) en forma de interferencia entre símbolos (ISI). Los sistemas de comunicación digital de vanguardia se diseñan para mejorar las condiciones adversas, por tanto, se requiere de implementar funciones sobre hardware (como los circuitos integrados) o el software que se ejecuta sobre el procesador o procesadores de señal digital o el microprocesador (Kwang-Cheng, Chen and Ramjee, 2009).

En particular en el estudio de la propagación, las técnicas de ingeniería utilizadas en los sistemas de telecomunicación están condicionadas por factores físicos dominantes que afectan al medio de transmisión utilizado. Para el caso de los sistemas de comunicaciones inalámbricos el principal medio de transmisión son los medios no guiados que proporciona el soporte a las ondas radioeléctricas, para el cual es fundamental el estudio del comportamiento de los niveles de señal y los fenómenos que intervienen.

El comportamiento de dichas ondas se establece con los modelos matemáticos propuestos por las leyes de Maxwell. La aplicación de dichas ecuaciones describen la teoría



electromagnética, que nos proporcionaría de forma exacta las magnitudes de las variables a analizar (intensidad de campo electromagnético, potencia recibida, niveles de tensión o niveles de corriente), lo cual es posible con el conocimiento exacto de las condiciones de contorno tales como: posición, forma y composición de todos los objetos situados en el campo de acción de las ondas para que en cualquier instante de tiempo sea posible determinar el valor de las magnitudes mencionadas (Yin & Cheng, 2016).

Sin embargo, estas aproximaciones sólo serían posibles mediante complejas técnicas de simulación iterativa, por tal razón se debe buscar una caracterización alternativa suficientemente precisa para proporcionar una buena estimación de la realidad y a la vez suficientemente sencilla como para que su tratamiento matemático sea práctico; esto es posible con el estudio empírico, mediante una serie de modelos más o menos complejos que describen el comportamiento de las magnitudes necesarias para describir el medio de transmisión y poder aplicar las técnicas que faciliten la transmisión fiable de la información (Lotsberg & Thomsen, 1998).

Por tanto, mediante los mecanismos de propagación se puede determinar la propagación de las ondas electromagnéticas y los niveles de señal recibidos que dependen de: la longitud de onda, objetos interpuestos entre el emisor y receptor, objetos reflectores de las ondas, tamaño y composición de los objetos, los cambios en la posición del terminal móvil, los cambios en los objetos en los que se producen las reflexiones, difracciones en objetos interpuestos, atenuaciones debidas a objetos entre las antenas, vegetación, paredes, la refracción atmosférica y las reflexiones producidas por objetos lejanos y próximos (Haslett, 2008).

### 1.1. Consideraciones generales sobre los modelos de predicción

En el diseño de un modelo de propagación en lo posible se incluyen todos los parámetros que afectan una señal de radio frecuencia para obtener los resultados más significativos por medio de la modelización, la selección del mejor modelo predictor depende de las reglas y consideraciones generales que se tienen del medio donde se va aplicar, los niveles de potencia, las características técnicas de los equipos de transmisión y recepción, las condiciones meteorológicas, como también los objetos y obstáculos que están presentes y que afectan la potencia de la señal que se está analizando.

En condiciones favorables (Rubinstein, 2002) el objetivo principal de un modelo se basa en seleccionar el que más variables sea capaz de representar del ambiente de estudio, para interpretar las condiciones ambientales y los factores que van a proporcionar la información más completa del medio dentro del cual se realizan las mediciones, esto genera una precisión de las condiciones de propagación prescritas para obtener modelos empíricos generales bajo condiciones reales de la zona de trabajo.

La Comisión de Estudio de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional en Telecomunicaciones UIT-R ha propuesto técnicas, métodos y prototipos como referentes para diferentes condiciones y variaciones: técnicas, físicas y geográficas, como es el caso del compendio de la recomendación (International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation P.1144-10, 2019), donde se detallan las orientaciones ideales sobre la selección de un modelo adecuado para la predicción de la propagación de acuerdo a parámetros como: sistemas de radio, tecnologías, frecuencia de trabajo, niveles de potencia, ambientes a confinar, distancias de modelización, datos y características geográficas, entre otras.

En el proceso del diseño de un modelo matemático basado en mediciones experimentales se deben incluir todos los principios fundamentales de la propagación entre ellos:

- Los mecanismos de propagación: que incluyen el espacio libre, reflexiones producidas por el suelo y por edificios, difracción, refracción.
- De igual forma, el oscurecimiento y desvanecimiento rápido.
- La absorción y la dispersión producida por la atmosfera.

## 1.2 Estimación de parámetros con pruebas estadísticas

El análisis de las características de potencia de un enlace de radiocomunicaciones inalámbricos se puede determinar seleccionando un ambiente apropiado, para ello se delimita una zona objeto de estudio y sobre éste se extrae una muestra promedio que sea significativa, con ayuda de la estadística inferencial se acotan los intervalos de confianzas para la media y establecen pruebas de hipótesis sobre los cuales se puede inferir que fenómenos están asociados a la respuesta de aleatoriedad de las observaciones.

Como lo argumenta (Abreu, 2012) en las pruebas estadísticas se cotejan los datos más significativos *observados* con los datos *esperados* por medio de los estadísticos básicos como: la media la desviación estándar, la mediana el valor máximo, el valor mínimo , la varianza, entre otros. Dichas consideraciones de los verdaderos parámetros son el resultado de la selección de una población muestral definida y acotada previamente; pero cuando se delimita el espacio muestral para condiciones lo más reales posibles sobre la muestra, se mejora la precisión de los parámetros estadísticos, sin embargo, si se desea aumentar el tamaño de la muestra por tanto el nivel de ajuste será mucho mejor.

En la ejecución de pruebas de hipótesis, se proyecta un supuesto valor representativo que es el parámetro poblacional. Después se extrae y se almacena una muestra aleatoria que se compara con el estadístico muestral, así como la media ( $x$ ) obtenida, con el parámetro hipotético; se compara con una supuesta media poblacional ( $y$ ), posteriormente se acepta o se desecha el valor hipotético, según proceda y finalmente se descarta el valor hipotético cuando el resultado muestral resulta muy poco probable cuando la hipótesis es cierta (Espinoza, 2018).

En las pruebas estadísticas es importante describir como se relacionan las variables por medio de ecuaciones que tienen un comportamiento de tipo lineal o no lineal, y que es posible especificar dicha relación, por ejemplo, mediante un diagrama de dispersión con la intención de modelar la tendencia de los datos para describir los resultados de forma experimental.

### **1.3 Aspectos de la planificación de un sistema de radiocomunicaciones**

#### **1.3.1 Planificar el sistema de radio**

Para cumplir con una solución eficiente de cobertura de una zona de servicio proyectada, se debe asegurar por un aparte, la intensidad de la señal ya sea en campo eléctrico o potencia en decibeles, como también la relación de señal/interferencia mínimas, de forma que exista una calidad del servicio (QoS) en la comunicación. Es por eso que la predicción de cobertura de la propagación es un factor importante que se considera el área de diseño y planificación de redes de comunicaciones.

Generalmente, la función de un planificador de red radio móvil terrestre es la de proyectar un cubrimiento de la zona de servicio lo más grande posible evitando la instalación de estaciones de radio base para garantizar la calidad del servicio (Rubinstein, 2002).

Normalmente, un modelo predice las intensidades de campo eléctrico o potencia de la señal bajo ciertas condiciones técnicas y ambientales, éste modelo es una guía para que los planificadores de redes inalámbricas logren coberturas de servicio más adecuadas, siempre y cuando no excedan los límites de trabajo y niveles de radiación de potencia de los equipos de radio transmisión. Para tal fin, se realizan simulaciones y predicciones estadísticas de la intensidad de la señal deseada, todo esto con procedimientos analíticos para proyectar que sistema resulta más conveniente usar bajo condiciones normales y extremadamente críticas hasta donde se pueda abarcar la zona de servicio.

Por medio de las reglamentaciones es factible ejecutar buenas prácticas que permiten conseguir una predicción en los casos más desfavorables de forma que se seleccione el modelo y sus parámetros de acuerdo a la siguiente disposición técnica:

Seleccionar un método o modelo con base en las condiciones de uso como: banda de frecuencias, distancia, altura de la antena receptora, entre otras.

Realizar ajustes con los factores de corrección al modelo de forma que se pueda observar las limitaciones más importantes, entre ellas se consideran: una antena de baja recepción, despolarización, variación de la altura de la estación transmisora, diversidad espacial, atenuación por causa de la vegetación, entre otros.

Considerar los resultados más pesimistas en situaciones como lo expone la norma (Manual, 2011) en donde el análisis de los valores más altos sucede desde al menos el 50% de los tiempos de medición hasta lograr resultados hasta del 90% de situaciones adversas, estimando estadísticas de variabilidad de retardo de tiempo de llegada de la señal y de situaciones de múltiplex reflexiones que se producen en el ambiente a caracterizar.

Prever la variedad de tipos de desvanecimientos de señal más pronunciados que se presenten en la mayoría de las condiciones típicas de propagación de las ondas radioeléctricas en el servicio móvil terrestre

Los modelos estadísticos para el desvanecimiento se pueden analizar con base en la recomendación (International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation P.530-17, 2017) donde se detallan los métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de radio terrestre; mediante el empleo de las estimaciones de desvanecimiento (para un determinado porcentaje de fiabilidad), se puede tener convenientemente en cuenta el desvanecimiento si se degrada la sensibilidad efectiva del receptor móvil y luego se estima el borde de la zona de cobertura para este valor reducido de sensibilidad al umbral, además de aplicar los criterios que ofrece el manual sobre la gestión Nacional del espectro (Rancy, 2015).

Un ejemplo puede ser que, si la sensibilidad de un receptor es de  $-105$  dBm y se estima que el mayor desvanecimiento para el 99% de las atribuciones no excede de 15 dB, entonces, al calcular la zona de cobertura proyectada, la sensibilidad de umbral se reducirá a:  $-105$  dBm + 15 dB =  $-90$  dBm.

### **1.3.2. Evaluar la interferencia y gestionar el espectro.**

En la práctica existen varios tipos y combinaciones de interferencia por multitrayectorias entre el emisor y el receptor, para lo cual se usan los métodos de predicción de propagación para comprobar cuál es la interferencia no deseada, que muchas veces es difícil establecer en forma holística con los métodos prácticos existentes al considerar una gama amplia de distancias y porcentajes de tiempo para generar buenos resultados. Esto sucede porque en las medidas de campo es importante determinar los niveles más fuertes de interferencia que no vayan a afectar la naturaleza de la señal en condiciones de propagación favorable (Tuan et al., 2003).

Para evaluar la interferencia en el proceso de predicción en conjunto con los parámetros que se estudian se puede seleccionar de acuerdo a los siguientes principios:

Seleccionar un modelo bajo condiciones de cielo despejado favorables de la propagación de la señal no deseada valorando: la visibilidad directa, la difracción, dispersión troposféricas, según sea el caso de la frecuencia de trabajo, variación de altura y ganancia del transmisor y propagación por efecto de reflexión-refracción en el trayecto.

Evaluar cuales son los efectos de los factores de corrección como por ejemplo: la altura más alta de antena receptora, los márgenes de visibilidad con línea de vista directa, entre otros; con el fin de lograr una propagación más favorable.

Valorar si la aplicación del modelo utiliza las estadísticas de variabilidad de tiempos y situaciones del entorno, en la práctica se usa el 10% de variabilidad de tiempos en el 50% de situaciones.

Considerar los errores que se originan al implementar un modelo cuando se ajusta o calibran los equipos, los errores al leer, codificar y tabular los datos, errores en la captura de los datos, error absoluto, error crítico, entre otros.

Técnicamente la evaluación del espectro por parte de la Agencia Nacional del Espectro (ANE) incluye dentro de sus actividades administrativa el estudio de la interferencia como política públicas con base en las disposiciones internacionales para gestionar el espectro conforme al Reglamento de Radio-comunicaciones y otros documentos jurídicos conexos (Ministerio de las TIC, 2016). Por tanto, el estudio de interferencia es una actividad que se ejecuta al momento de hacer una subasta, control y supervisión del espectro, por ende requieren del uso a menudo de ciertos modelos matemático y empíricos para cuantificar el valor de la interferencia al momento de coordinar la asignación y uso nacional e internacional de las frecuencias en los procesos de subasta del espectro.

Mediante una concepción más general sobre las características específicas para las diferentes bandas de radiofrecuencia, como norma general, la fuerza de la señal de radio recibida siempre depende de las características ambientales de la trayectoria y de la variabilidad de la atmosfera, que de acuerdo a la capa que atraviesa el enlace de radio y las condiciones meteorológicas, se deben estimar que factores están involucrados y que situaciones de interferencia se presenta al momento de obtener un modelo analítico.

Por tanto, no hay un modelo de propagación universal que pudiera ser desarrollado para abordar todas estas situaciones planteada de forma sistémica del conjunto dichos parámetros y variables, es decir, que se desarrollan modelos de propagación para determinados usos de acuerdo al rango de frecuencias de operación, tipos de sistemas de



radiocomunicación, diferentes tecnologías y modos de aplicación particular (Cespedez & Fajardo, 2012).

### **1.3.3 Comparar las mediciones y hacer predicciones**

En una visita a sitio o comprobación del espectro en un mantenimiento o situaciones de falla del servicio normalmente los ingenieros de diseño y planificación tienen que realizar la verificación de las zonas de cobertura del sistema implementado, esto se realiza con una antena omnidireccional mediante la toma de muestras de la intensidad de campo con trazados mínimo de hasta 4 rutas de forma radial hasta encontrar el nivel mínimo de sensibilidad o piso de ruido de la potencia generada en las estaciones de radiocomunicación. Para el caso en que la antena direccional ubicada en la estación base radia en un sector determinado se ejecuta una caracterización detallada del sitio donde se está prestando el servicio donde se van a realizar la toma de muestras de niveles de señal en la dirección que apunta dicho sector.

En las campañas de mediciones para la comprobación normalmente se desplaza el receptor de prueba fuera de la estación de base y se monitorea la intensidad de campo recibida, luego se compara con los valores de las predicciones y los valores predeterminados del umbral de sensibilidad del receptor para la zona de trabajo confinada, una recomendación, como lo interpreta (Rubinstein, 2002) es necesario comprobar los niveles de interferencia proyectados, por lo tanto, casi siempre se hacen mediciones a lo largo de un perímetro protegido contra la interferencia, por ejemplo, las fronteras políticas entre dos países.

Permanentemente las empresas operadoras de sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas realizan el replanteamiento de la implementación de todos sus enlaces debido al crecimiento de los servicios y necesidades de los clientes, para tal fin realizan el análisis de los

parámetros y la aplicación de criterios de ingeniería en caso de ejecutar ajustes en los equipos de radiocomunicación, traslados de los mismos, nuevas configuraciones o mejoras en los diseños de los enlaces de radiocomunicación; que involucra el cálculos de factores de ganancias y pérdidas asociadas a las antenas transmisoras y receptoras, líneas de transmisión y propagación en el medio ambiente para determinar la máxima distancia a la cual el transmisor y un receptor puede operar adecuadamente (Hernando Rabanos, 2012).

Un parámetro importante es el nivel de umbral de sensibilidad del receptor, que es el nivel de señal a la cual el radio detecta los errores continuos a una tasa de error de bits (BER) específica, otro es la ganancia del sistema, que se define como la diferencia entre la potencia de salida del transmisor y la potencia de umbral en el receptor, éste parámetro puede ser utilizado para reducir el tamaño de las antenas o su reconfiguración de ganancia o mejorar la confiabilidad de la trayectoria (Restrepo Angulo, 2010).

En términos de la ingeniería de radiocomunicaciones en campo es conveniente tener presente en el estudio y análisis del sistema, las siguientes variables de acuerdo al subsistema de radio al cual se le están realizando las mediciones, ajuste y comprobación de parámetros, entre los que se pueden mencionar:

- En la sección de modulación examinar la estabilidad de la frecuencia y la dispersión de energía.
- En el transmisor comprobar la potencia y la anchura de banda de densidad espectral.
- En la antena de transmisión y recepción sopesar los diagramas de radiación y polarización.

- En la propagación en el espacio libre, estimar la atenuación espacial, absorción, desvanecimiento, efecto Doppler, despolarización, las fuentes de ruido y la densidad espectral.
- En la entrada del receptor observar el factor de ruido (FN), la relación portadora ruido (C/N) y la relación portadora interferencia (C/I).
- En las etapas de RF/IF estimar estabilidad, selectividad y respuestas no deseadas.
- En las etapas de amplificación tener presente la no linealidad que producen los componentes electrónicos.
- En el demodulador valorar la respuesta de la relación señal a ruido (S/N) y la relación señal interferencia (S/I).

En la actualidad dependiendo de las tecnologías móviles e inalámbricas existen otros parámetros que son esenciales estudiar en el proceso de la medición del espectro, entre estos se destacan:

1). La intensidad de la señal del Sistema Global para las comunicaciones Móviles (GSM) para Segunda Generación (2G) se define por un solo valor: (Indicador de intensidad de la señal recibida) RSSI; dicho valor es negativo, y cuanto más cercano es a cero, más fuerte es la señal (Arimas, 2019).

También, se puede calcular la medida de intensidad con el Arbitrary Strength Unit (ASU) que es otra unidad de medida empleada para expresar la fortaleza de la señal móvil. A diferencia de dBm dicho valor se obtiene, haciendo la conversión en dBm.

Por ejemplo si se tiene el valor del ASU, se pueda calcular como:

$\text{dBm} = 2 * \text{ASU} - 113$ ; El valor del ASU varía entre 0 y 31 para indicar la fuerza de la señal.

*Jorge Enrique Herrera Rubio*

2). Para el modo de servicio de Tercera Generación (3G), hay tres medidas relevantes:

- ✓ Indicador de intensidad de señal recibida (RSSI). RSSI es un valor negativo, y cuanto más cerca de 0, más fuerte es la señal.
- ✓ EC/IO: Mide la calidad de señal de la torre al modem del móvil indica la relación señal / Ruido de enlace descendente. EC/IO es un valor negativo de dB. Los valores más cercanos a 0 son señales más fuertes, es un indicador de la relación entre la energía recibida / buena y la interferencia / mala energía.
- ✓ RSCP: indica la Potencia del Código de Señal Recibido.
- ✓ Los valores estándar de RSSI para 3G son básicamente los mismos que 2G.
- ✓

3). Para el modo de servicio de Cuarta Generación (4G), hay cuatro mediciones relevantes:

- ✓ RSSI - Indicador de intensidad de señal recibida. RSSI es un valor negativo, y cuanto más cerca de 0, más fuerte es la señal.
- ✓ RSRP: la Potencia de Señal Recibida de Referencia, es la potencia de las señales de referencia de la tecnología inalámbrica de banda ancha Long Term Evolution (LTE) distribuidas en todo el ancho de banda y banda estrecha.
- ✓ RSRQ: La Calidad de Señal Recibida de Referencia es un tipo de medida de la señal Portadora /interferencia (C/I) e indica la calidad de la señal de referencia recibida (similar a EC/IO).
- ✓ SINR: Es la Señal de Interferencia más Relación de Ruido (se necesita un mínimo de -20 dB SINR para detectar RSRP/RSRQ). Indica la capacidad de

rendimiento del canal. Como su nombre lo indica, SINR es la fuerza de la señal dividida por la fuerza de cualquier interferencia (Cablefree, 2019).

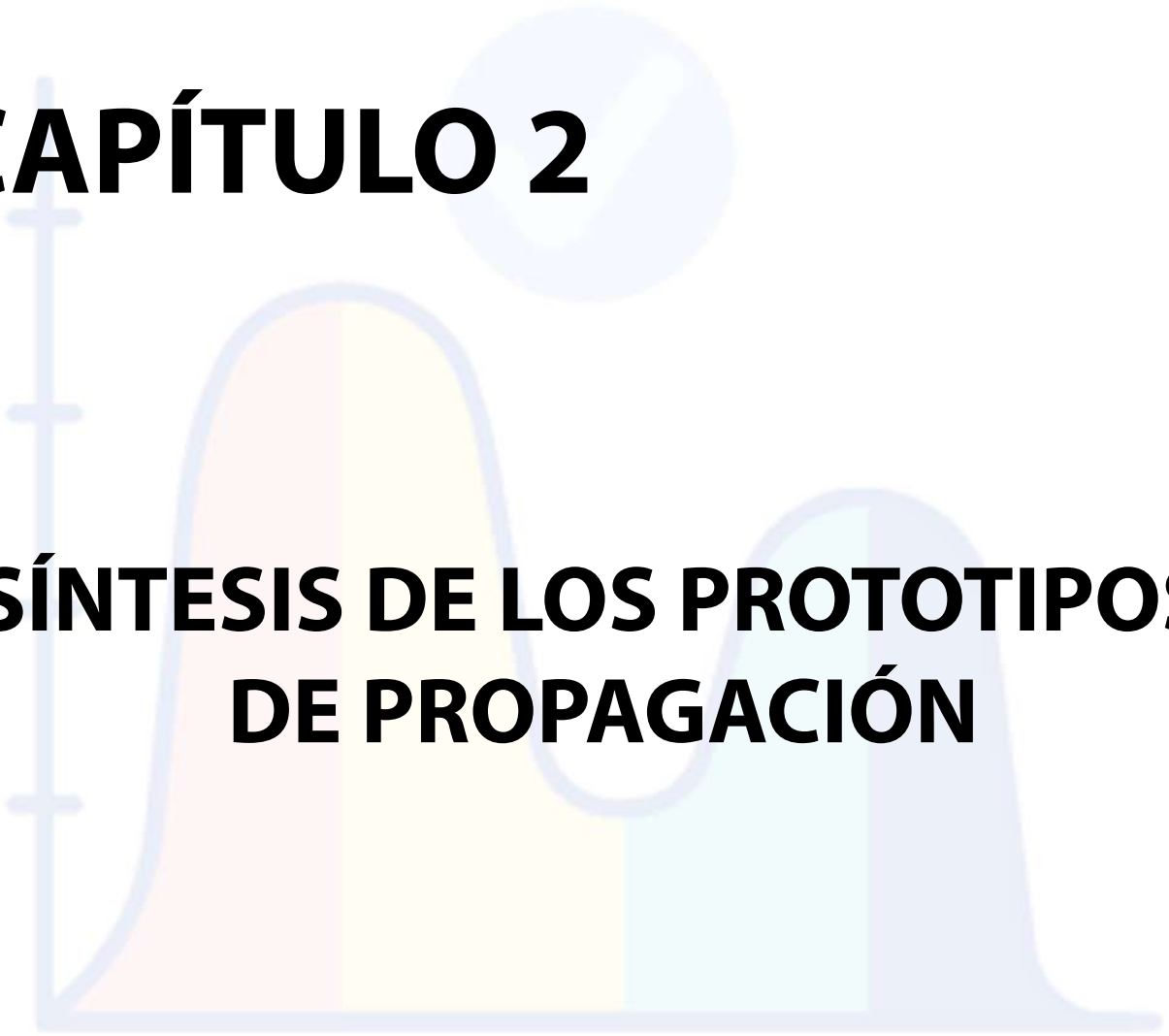
4). En el caso de RSSI para LTE se calcula a partir de otras mediciones relacionadas con la señal:

Potencia de banda ancha = ruido + potencia de celda de servicio + potencia de interferencia (Landre & Rawas, 2013).

5). Para las redes inalámbricas (WiFi) el modo de servicio se representa con el valor del RSSI para indicar de intensidad de señal recibida.

# **CAPÍTULO 2**

## **SÍNTESIS DE LOS PROTOTIPOS DE PROPAGACIÓN**



## CAPÍTULO 2

### SÍNTESIS DE LOS PROTOTIPOS DE PROPAGACIÓN

Las nuevas tecnologías de radiocomunicación permiten a través de técnicas electrónicas mejorar el nivel de potencia de las señales de radio que se transmiten en un enlace para realizar coberturas de acuerdo al tipo de frecuencia a trabajar, sea un sistema con línea de vista (LOS) o sin línea de vista (NLOS) en situaciones en las que la geografía dificultan el emplazamiento de los enlaces.

Aunque existen muchas ventajas de los sistemas de comunicaciones inalámbricas, se presentan algunas limitaciones en el funcionamiento debido a los problemas implícitos en el canal de radio; la distancia entre transmisor y receptor, que puede variar por la obstrucción debido a: los edificios, árboles y demás objetos cuando se planifica un sistema con línea de vista directa, para tal fin se plantean diferentes escenarios de prueba de acuerdo a los niveles de cobertura para la prestación del servicio, tipo de servicio, características de calidad de los equipos, calidad el servicio y grado del servicio (Teng et al., 2019).

Como el proceso de modelado y predicción del canal es muy complejo cuando se diseña un sistema de radio estaciones base, por lo general, se recurren a técnicas estadísticas mediante las mediciones en sitio, para esto, se confinan las zonas de medidas para un determinado espectro de frecuencia, se selecciona un aérea en particular y se escoge un sistema tecnológico particular (3G,4G,LTE); debido a la cantidad de factores, elementos y parámetros que afectan una comunicación se han establecido la aplicación de modelos

matemáticos que validan con un alto grado de confiabilidad el proceso de estudio, diseño, planificación e implementación de un sistema de radio propagación.

El nivel de potencia recibida promedio se obtiene de las mediciones realizadas a intervalos regulares de tiempo y a distancias fijas (entre el transmisor y el receptor) establecidas según la longitud de onda de la frecuencia en particular a estudiar, considerando los posibles elementos que reflejan, difracta y atenúan la señal en la cercanía del punto de interés.

Existen dos tipos de prototipos de estudio de potencia de las señales: a gran escala (Large-Scale) que son de gran utilidad para el cálculo de áreas de cobertura para sistemas de radio con variaciones lentas cuando la distancia de medida es mayor a la longitud de onda, en este caso existe una dependencia de la distancia y la característica del entorno de medición (urbano, rural , semi urbano) de la señal recibida por el móvil, la señal obtenida es la sumatoria de ondas planas que de forma aleatoria varían en amplitud, de fase y de ángulo al momento de llegada en el receptor; y el de pequeña escala (Small-Scale) que predicen los cambios rápidos en la intensidad de la señal recibida a cortas distancias normalmente se denomina modelo de desvanecimiento (Rappaport, 2002b), las variaciones se establecen en distancias que no superan la longitud de onda, depende del ancho de banda de la transmisión y los efectos multitrayectorias (debido a la atenuación constante y la cancelación de fase).

Existen muchas formas de estudiar los modelos de propagación para poder entenderlos, en este documento se pretende sintetizar las características, funcionalidades y parámetros puntuales a considerar en el momento de realizar un estudio de propagación del espectro para modelos exteriores.



Por la forma o la técnica de estudio se puede hablar del análisis de la radio propagación basada en métodos: empíricos, estadísticos, semi empíricos y determinísticos. De acuerdo al entorno de trabajo de los enlaces de radio se estudian como sistemas móviles y fijos. Por el tamaño y área de cobertura se estudian como modelos de propagación en ambientes interiores (Indoor) y exteriores (Outdoor).

De acuerdo a la zona a cubrir y densidades poblacionales el estudio se puede dividir por áreas como: urbanas, semi urbanas o suburbanas y rurales, aunque algunos autores hablan de modelos mixtos; pero también realizan el estudio por densidad de habitantes y los subdividen como urbanos ciudades grandes (macro celdas), pequeñas (micro celdas), entornos zonales (pico celdas) y áreas más pequeñas (pico celdas).

En síntesis, el estudio se puede clasificar de acuerdo al área de cobertura que depende de los niveles de potencia del transmisor de la estación base, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1: Modelos de propagación por tipo de área de cobertura

MACRO CELDAS		MICRO CELDAS		PIC O CELDAS		MEG A CELDAS	
Modelos de pérdidas de trayectoria empíricos	Modelo de factor de ecos no deseados	Modelos empíricos	Modelo de pendiente dual	Modelos empírico de propagación dentro de los edificios	Modelo de factor de paredes y pisos	Modelos estadísticos	Modelo de Lee
	Modelo de Okumura-Hata		Modelo de micro celdas de Lee		COS T231 Multi-Wall Model		
	Modelo de COST 231-Hata		Modelo de Har-Xia-Bertoni		Modelo de Ericsson		Modelo de Corazza

	Modelo de Lee	Modelos de línea de vista	Modelo de dos rayos		Modelos empíricos para redes LAN inalámbricas		Modelo de Lutz
	The Ibrahim and Parsons Model		Modelo de cañón de calle		Predicciones basadas en mediciones		Distribución de la altura de los edificios
Modelos físicos	Modelo de Allsebrook y Parsons	Modelos de línea de vista	Modelo de cañón de calle usando ITU-R P.1411	Modelos físicos de propagación en interiores dentro de los edificios	Modelos de trazado de rayos para pico células		Tiempo Compartido de Sombra
	Modelo de Ikegami		Modelo de guía de ondas aleatoria		Modelo interior UTD de complejidad reducida		
	Difracción en el tejado		Mecanismos de propagación y consideraciones de planificación de celdas		Propagación entre pisos		
	El modelo de borde plano	Modelos sin línea de vista	Modelo recursivo		Modelos físico-estadísticos para zonas edificadas	Propagación en pisos individuales	Modelo de series temporales
	Modelo Walfisch-Bertoni		Modelo UIT-R P.1411 sin línea de vista			Modelos de línea de visión COST231	
	Modelo de COST 231-Walfisch-Ikegami					Modelos de ganancia en el suelo	
Modelo de ITU-R	Recomendación ITU-R P.1411	Modelos de rayos específicos del lugar	Modelos de propagación en edificios	Modelos sin línea de visión COST231			

	Recomendación ITU-R P.1546				Mecanismos de propagación		
--	----------------------------	--	--	--	---------------------------	--	--

Fuente: Adaptado y compilado de (Saunders & Aragon, 2018)

En el caso de las mega celdas los sistemas móviles son diseñados para proporcionar una cobertura verdaderamente global utilizando constelaciones de satélites de órbita terrestre baja y media, a través de los niveles de potencia de los transmisores que generan una huella mediante un grupo de haces de puntos de energía de cada satélite que radian potencia hacia las estaciones móviles o fijas ubicada en la Tierra. Las señales son típicamente recibidas por el móvil a ángulos de elevación muy elevados, de modo que sólo las características ambientales que están muy cerca del móvil contribuyen significativamente al proceso de propagación. Los efectos atmosféricos, pueden ser significativos y deterioran los enlaces en los sistemas que funcionan en ondas decamétricas y métricas.

Las técnicas de predicción de la propagación en mega células también deben combinar las predicciones de desvanecimiento rápido (multitrayecto) y de efectos de sombra, ya que, éstos tienden a producirse a escalas de distancia similares y, por lo tanto, no pueden separarse fácilmente. Las predicciones tienden a ser de naturaleza altamente estadística, sin dejar de tener en cuenta las grandes variaciones debidas al entorno local (Saunders & Aragon, 2018).

En términos generales por el tamaño de la celda estas se pueden clasificar de la siguiente forma:

Celdas globales: radio superior a los 100 km, permite la cobertura a zonal de difícil acceso.

Híper celdas: con distancias comprendidas entre 30 y 100km, caracterizadas en medios rurales.

Macro celdas: Con radios que van desde 1,5m a 30 km, son las configuraciones existentes en pequeñas ciudades y zonas suburbanas.

Micro celdas: son las extensiones de radio de cobertura entre 0,1 y 1,5 km, se emplea en ciudades grandes, la agrupación de múltiples micro celdas disminuyen el handover (el traspaso de señalización y uso de recursos entre celdas).

Pico celdas: sus dimensiones radiales oscilan alrededor de los 100 metros, tipos de configuraciones de oficinas, centros comerciales, estadios, parques, entre otras.

Femto celdas: abarcan radios de decenas de metros, útiles en los hogares e interiores de oficinas.

## 2.1. Modelos de predicción de acuerdo a la técnica de análisis y construcción.

La representación del problema de los niveles de potencia promedio recibida en un sistema de comunicaciones se puede sintetizar con un modelo para describir su comportamiento y generar una representación de la realidad, según (Parsons, 2000) se puede hacer una compilación como se muestra en la tabla 2 (Camargo Olivares, 2009).

Tabla 2. Modelos de propagación de acuerdo a las técnicas de construcción

<b>Tipos de modelos de acuerdo a la técnica de construcción</b>
<b>Modelos determinísticos o teóricos:</b>
<b>Modelo Flat Edge</b>
<b>Walfisch -Bertoni</b>

<p><b>COST 231 Walfisch-Ikegami</b></p> <p><b>Sakagami- Kubai Model</b></p> <p><b>Modelo MBX para macro células</b></p> <p><b>Ikegami Model</b></p> <p><b>Modelo de Friss</b></p> <p><b>Modelo de dos rayos</b></p> <p><b>Difracción por objetos</b></p>
<p><b>Modelos estadísticos o estocásticos:</b></p> <p><b>Estadística inferencial</b></p> <p><b>Estadística descriptiva</b></p>
<p><b>Modelos empíricos:</b></p> <p><b>Recomendación UIT-R P.1546</b></p> <p><b>Modelo de Hata</b></p> <p><b>Modificado de Hata</b></p> <p><b>Modelo de COST 231 Hata</b></p> <p><b>El modelo London de Ibrahim y Parsons</b></p> <p><b>Predicción de la propagación de Young's</b></p> <p><b>Modelo de Allsebrook's</b></p> <p><b>Modelo de McGeehan y Griffiths</b></p> <p><b>Modelo de Atefi y Parsons</b></p> <p><b>Modelo de Lee</b></p> <p><b>Modelos semi empíricos:</b></p> <p><b>Egli</b></p> <p><b>Walfisch</b></p> <p><b>Okumura</b></p>

<b>Ikegami</b>
<b>Longley-Rice</b>
<b>Modelos de caja negra</b>

Fuente: Elaboración propia

- Modelos determinísticos o teóricos: Son los que se basan en la representación matemática de las leyes de la propagación de ondas electromagnéticas, normalmente toman como referencia las leyes de Maxwell con el fin de predecir intensidad de la señal recibida, no se utilizan en el diseño de sistemas de comunicación porque su fundamento son las leyes físicas y se realizan los análisis matemáticos para referenciar el fenómeno y comportamiento particular de las ondas. Cuando se desea representar un sistema de radiocomunicaciones, este tipo de modelo carece de incertidumbre para considerar las posibles variables del entorno y por ende los cambios de estado del sistemas se puede predecir con seguridad y el comportamiento se valida con medidas de efectividad, es decir, se obtiene una solución óptima.

Par el caso de estudio a trabajar, específicamente utiliza la teoría de propagación del rayo, por medio de las técnicas como el trazado de rayos, técnicas UTD (Uniform Theory Diffract), su grado de efectividad radica en la utilización de alta capacidad de computo en el procesamiento de la información y las grandes bases de datos de la topografía del terreno a caracterizar, entre los modelos que más se destacan, tenemos: modelo espacio libre, modelo de FRIIS, Modelo de difracción por objetos delgados, modelo de dos rayos.

- Modelos estadísticos o estocásticos: Es la representación del comportamiento de las variables aleatorias en los que existe una secuencia cambiante de eventos que se analizan probabilísticamente durante un intervalo de tiempo. La precisión depende de la cantidad

considerable de muestras que se recolectan del ambiente de propagación a estudiar, a mayor cantidad de datos mayor es la precisión del modelo, en el caso del comportamiento de la energía o potencia en el espectro radioeléctrico se estudian: las funciones de distribución de probabilidad, las variables aleatorias log-normales, las correlaciones matemáticas y los métodos estadísticos: por clasificación, por asociación y por segmentación.

- Modelos empíricos: Se basa en las leyes físicas, en la experimentación y la lógica empírica, se obtienen como resultado de las observaciones y mediciones realizadas en campo sobre el ambiente de propagación en condiciones reales, estos modelos son principalmente utilizados para estimar la pérdida por trayectoria.

Con los modelos empíricos también es posible predecir otros fenómenos como por ejemplo: pérdidas por multitraectorias y desvanecimiento. Por tratarse de una validez para el contexto espacio-temporal en el que se aplica y se calibra, adquiere un alto poder predictivo con cierta capacidad explicativa, estos modelos se basan en tomar lecturas de potencia de la señal en diversos puntos dentro de un área geográfica específica, la información obtenida se analiza, se procesa y se generan una serie de curvas para describir el comportamiento del sistema de radio propagación estudiado. El nivel de precisión se relaciona con la cantidad de muestras obtenidas y la consideración de los errores que se pueden ocasionar en el procesamiento de la información, aquí se destacan los modelos: Egli, Walfish, Okumura, Okumura-Hata, Cost-231-Hata, Ikegami, Longley-Rice.

- Modelos de caja negra: Son modelos en los que sólo se reproduce la entrada y salida del fenómeno, sin preocuparse de lo que pase en el interior (Camargo Olivares, 2009).

En el campo de la ingeniería de radio propagación el diseño de cobertura y el emplazamiento técnico de un sistema de comunicación inalámbrica se recurre cualquiera de las categorías anteriormente descritas, para lograr la predicción más acertada.

## 2.2. Modelos de propagación para sistemas inalámbricos según el tipo de ambiente

En la implementación de redes tecnología móviles es importante contar con métodos de predicción basados en mediciones realizadas en algunas ciudades para modelar zonas de cobertura por medio de modelos empíricos, sin embargo, se requiere de modelos más precisos y, por lo tanto, aparecieron los modelos semi empíricos y teóricos (Bayram, 2014), que necesitan de más datos sobre la estructura física de las ciudades y su infraestructuras; para tal fin se estudian los parámetros que afectan la propagación por medio de modelos de propagación los cuales se agrupan por el tipo de ambiente, como se visualiza en la tabla 3.

Tabla 3: Modelos de Referencia por ambientes de estudio

<b>Ambiente Interior (Indoor)</b>	<b>Ambiente Exterior (Outdoor)</b>
<b>Modelo Teórico basado en las ondas electromagnéticas</b>	Modelos Teóricos de propagación de ondas electromagnéticas
<b>Modelo de transmisión en el espacio libre</b>	Modelo de FRIIS propagación en el espacio libre
<b>Modelo de dos rayos</b>	Modelo de dos rayos
<b>Modelo Longley-Rice</b>	Modelo Longley-Rice
<b>Log-Normal Shadowing Path Loss Model</b>	Modelo de Durkin
<b>Log-Distance</b>	Modelo Okumura-Hata
<b>Modelo simplificado por el número de suelos y muros</b>	Modelo Walfish-Bertoni
<b>Dual Slope-Model</b>	Modelo Ikegami
<b>Keenan-Motley Model</b>	Modelo Walfish-Ikegami
<b>Multi-Wall Model</b>	Model The COST-231o COST-231-Hata



<b>Motley - Simplificado</b>	Modelo The COST 231–Walfish–Ikegami
<b>Modelo de una pendiente</b>	Modelos: ITU-R1411 y ITU-1546-5
<b>Ericsson múltiples rompimiento</b>	Modelo Erceg C o SUI
<b>Factor de atenuación</b>	The ITU-Advanced Channel Model
<b>Modelos FDTD</b>	Modelo COST 207 GSM
<b>Modelo de Pérdida de Trayecto basado en COST-231</b>	Modelo de Xia
	Modelo de Young
	Modelo de Lee
	Sakagami-Kuboi
	Ibrahim-Parson
	Xia-Bertoni, Modelo MOPEM, ECC-33

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la tabla 3 que existe una mixtura de modelos, esto significa que algunos modelos se pueden aplicar en los dos tipos de ambientes dependiendo de las condiciones y caracterización que se haga de los mismos; en éste documento se realiza una descripción breve sobre la funcionalidad de los mismos, como también los más representativos que son utilizados en ambientes exteriores (otros quedan enunciados en la **tabla 3**) y que son parte del estudio de la metodología experimental que se utilizó en la medición del espectro que se explica la final del documento; en el caso de modelos en interiores no se incluye la explicación de estos.

### **2.2.1. Modelo Teórico basado en las ondas electromagnéticas**

Una explicación el fenómeno de la propagación electromagnética de acuerdo a (Balanis, 2016) consiste en analizar y describir la transmisión de energía que viaja a través de un medio, considerando las características específicas que van a determinar el comportamiento de las señales electromagnéticas; situación que se evidencia cuando las ondas electromagnéticas cambian la velocidad, la dirección inicial, la fase, la polarización y la intensidad de energía según las condiciones físicas del medio donde se propaga.

En el campo de la ingeniería el fenómeno electromagnético se estudia desde el punto de vista de la realidad física cuando se establece un enlace de radio excluyendo el espacio libre; por medio de la representación analítica y las medidas del nivel de intensidad en campo abierto es factible estudiar y predecir cuáles son las condiciones reales cuando se tienen presente los cuerpos, objetos, elementos y factores que van a alterar las características eléctricas y magnéticas de las ondas entre un sistema de transmisión en un extremo y el de recepción en el otro, en estas condiciones es cuando se deben considerar los mecanismos de propagación como: la reflexión especular, la atenuación, la reflexión difusa, la dispersión, la refracción y la difracción que intervienen en la propagación de las ondas electromagnéticas, por tanto las características del medio físico hacen que las ondas cambien por efecto de la interacción con el medio en donde se propagan las ondas.

Sin embargo, se debe considerar que los campos electromagnéticos son el resultado de la observación e investigación de las ecuaciones de Maxwell como se expresa en las ecuaciones 1, 2, 3 y 4:

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

*Jorge Enrique Herrera Rubio*

E: Es la intensidad del campo eléctrico [V/m]

H: Es la intensidad del campo magnético [A/m]

D: Es el desplazamiento del campo en [C/m]

B: Es la inducción magnética en [W/m]

J: Es la densidad de corriente eléctrica en [A/m<sup>2</sup>]

P: Es la densidad de carga eléctrica en [C/m<sup>3</sup>]

t: Es el tiempo en segundos

$\nabla$ : Es el operador de vector diferencial

Realizando la solución de las ecuaciones de Maxwell para entender el comportamiento del campo electromagnético y estableciendo las condiciones:  $J=0$ ,  $B=\mu H$  y  $D=\epsilon E$ , donde  $\mu$  es la permeabilidad magnética y  $\epsilon$  la constante dieléctrica de la atmósfera.

Por tanto, al resolver dichas ecuaciones con las condiciones dadas, es posible obtener E y H con la siguiente expresión, de la forma:

$$\nabla^2 E - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Ecuación 5}$$

Esto permite deducir que al realizar los ajustes en las ecuaciones de igual forma se puede obtener la ecuación de onda para **H**.

Atendiendo a los aportes de Maxwell para soluciones no triviales más simples dichas ecuaciones de onda describen el comportamiento de una onda plana con **E** y **H** normales entre sí y con la dirección de propagación.

Por tanto, es probable relacionar las magnitudes de los componentes del campo **E** y **H** por medio de la ecuación 6:

$$H = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E \quad \text{Ecuación 6}$$

### 2.2.2. Modelo de transmisión en el espacio libre, ecuación de Friis

Es el sistema analítico elemental que engloba los parámetros básicos y necesarios en una ecuación para predecir el nivel de potencia de la señal cuando entre el transmisor y el receptor en condiciones óptimas e ideales en un trayecto existe línea de vista (LOS), sin obstáculos u objetos. Bajo estos criterios existe la posibilidad que para todos los sistemas inalámbricos se pueda modelar la propagación en el espacio libre.

Este modelo ideal propone que en términos básicos, la potencia que se recibe decrece en función de la distancia de separación al cuadrado, que existe ente el equipo transmisor y el receptor elevada a alguna potencia, considerando las perdidas y la frecuencia de uso en el enlace para el cual se están realizando los cálculos.

En el punto de recepción o punto de medida de la potencia recibida en el espacio libre por la antena que capta la potencia separada a una distancia  $d$  está representada con la ecuación 7.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{4\pi^2 d^2 L} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

Pt: es la potencia transmitida.

Pr: es la potencia recibida la cual es función de la separación Tx-Rx (transmisor-receptor).

Gt: es la ganancia de antena transmisora.

Gr: es la ganancia de la antena receptora.

d: es la distancia de separación entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx) dada en metros.

L: es el factor de pérdida del sistema no relacionado a la propagación.

$\lambda$ : es la longitud de onda dada en metros.

La ecuación 8 representa la ganancia de la antena como:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad \text{Ecuación 8}$$

En esta expresión la apertura efectiva ( $A_e$ ) se relaciona con el tamaño físico de la antena y  $\lambda$  se relaciona con la frecuencia de la portadora mediante la ecuación 9:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

f: es la frecuencia de la portadora dada en Hertz.

c: es la velocidad de la luz dada en metros/segundo.

Los valores de Pt y Pr se expresan en vatios o mili vatios. Gt y Gr son cantidades adimensionales, pero puede representarse en niveles de potencia en dB realizando la correspondiente conversión.

Normalmente las pérdidas se pueden incluir el cálculo cuando se tienen los valor de las pérdidas que se introducen en los: los filtros, líneas de transmisión, conectores y otros componentes, que afectan el sistema y se representan con la letra L, en condiciones ideales L=1 significa que no hay pérdidas en el sistema, sin embargo, al considerar dichas pérdidas se deben calcular con la ecuación 10 (Oriol Sallent Roig, José Luis Valenzuela González, 2003).

$$L = \frac{c^2}{(4\pi df)^2} \quad \text{Ecuación 10}$$

La ecuación 7 muestra que la potencia de la señal recibida se atenúa conforma el cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor, lo que implica que decae 20 dB/década.

En términos generales, las pérdidas que presentar en un trayecto o enlace de radio se puede representar como la atenuación de la señal se expresa de forma positiva medida en dB (decibeles), en los cálculos se pueden o no incluir el efecto de ganancia de las antenas. Cuando se incluyen en la ecuación ésta queda expresada de la forma, ver ecuación 7:

Las pérdidas por trayectoria se representan como la atenuación de la señal de forma positiva medida en dB, y puede o no incluir el efecto de ganancia de las antenas. Cuando se incluyen en la ecuación que expresada de la forma, ver ecuación 11:

$$PL(dB) = 10 \log \frac{P_r}{P_t} = -10 \log \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d^2)} \quad \text{Ecuación 11}$$

También se puede expresar de la siguiente manera:

$$L_p(\text{dB}) = 20 \text{ Log } d + 20 \text{ Log } f - 10 \text{ Log } G_t - 10 \text{ Log } G_r - 147.55 \quad \text{Ecuación 12}$$

Si la ganancia de las antenas es excluida, por tanto el valor de dicha ganancia es igual a uno y la ecuación se expresa como:

$$PL(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \frac{\lambda^2}{(4\pi d^2)} \quad \text{Ecuación 13}$$

En la práctica la ecuación de Friis se aplica en los sistemas radioeléctricos de comunicaciones solo para hallar la potencia de recepción para valores de distancias “d” que estén en la región de campo lejano (far-field) de la antena transmisora, las distancias a considerar debe ser superiores a unas  $10\lambda$  en donde no se presente efectos de los campos cercanos (near-field) de radiación e inducción y la onda puede considerarse plana (Manual, 2011).

Para modelar un enlace en función de la ecuación de Friis se establece que la potencia recibida se calcula para la región de campo lejano y que en términos de radiaciones de las ondas electromagnéticas se define como: la región del campo de una antena en la que la distribución del campo angular es esencialmente independiente de la distancia a la antena.

Para dicho análisis, si la antena tiene una dimensión global máxima de valor D (diámetro del haz en el acoplador de salida), la región de campo lejano se considera que

existen solo a distancias mayores de  $R$ , si  $R > 2D^2 / \lambda$  entonces se cumple la condición de campo lejano desde la antena a una distancia  $R$  establecida

Para una antena ubicada en el horizonte cercano o en el infinito, la región de campo lejano a veces se denomina la región de Fraunhofer, en esta región, los componentes del campo son esencialmente transversales y la distribución angular es independiente de la distancia radial donde se realizan las medidas. Se considera que el límite interno es la distancia radial  $R$ , por tanto la distancia de Fraunhofer está dada por la ecuación 14:

$$dF = \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{Ecuación 14}$$

Sabiendo que:

$D$  es la dimensión física mayor de la antena, también se debe satisfacer la condición  $dF \gg D$  y  $dF \gg 1$ , lo anterior permite comprobar que esta región espacial ayuda al análisis de la potencia recibida que se produce cuando la onda electromagnética radiante está alejada del transmisor en función de la longitud de onda de la frecuencia de trabajo (Balanis, 2016).

Esta ecuación no satisface las condiciones de la ecuación cuando  $d=0$ . Por esta razón la distancia  $d_0$  (o distancia cerrada cerca del transmisor) es una distancia o punto de referencia con una potencia recibida conocida. La potencia recibida  $P_r(d)$  a cualquier distancia  $d > d_0$  puede relacionarse con  $P_r$  en  $d_0$ .

$P_r(d_0)$  puede predecirse de la ecuación de Friis o puede ser medida tomando el promedio de las potencias recibidas en cualquier punto a una distancia  $d_0$  del transmisor, la distancia  $d_0$  se deberá escoger de tal manera que esté dentro de la región far-field y debe ser



menor que cualquier distancia práctica utilizada en sistemas de comunicación móvil (Rappaport, 2002b).

### 2.2.3. Modelo de dos rayos

El canal de radio móvil se define como el uso de la frecuencia a utilizar durante el único camino directo entre la estación base y un móvil, pero rara vez es el único medio físico para la propagación; de ahí que el modelo de propagación en el espacio libre de acuerdo a la ecuación 7 no garantiza la exactitud en el cálculo, por razón existen las imperfecciones del canal de radio móvil que generan fenómenos como: los multi trayectos, el sombreado del canal, retardos de fase y el desvanecimiento que deterioran la calidad de la señal en potencia que llega al receptor (Cardama et al., 2000).

Por tanto, cuando se modela el comportamiento del canal inalámbrico se pueden predecir los factores que deterioran el campo electromagnético que lleva la información de los datos desde el equipo transmisor a la salida de la antena y todo el proceso y efectos de la transmisión en el espectro radioeléctricos hasta que la antena receptoras capta la información que se procesa y se recibe en el equipo activo, una aproximación más práctica se configura con el modelo de reflexión en el suelo de 2 rayos que se muestra en la **figura 2**, su utilidad se basa en la óptica geométrica, y considera tanto la ruta directa como la ruta de propagación reflejada en la tierra entre el transmisor y el receptor.

Es un modelo analítico más preciso que el modelo de pérdida en espacio libre (PEL), utilizado en sistemas móviles porque considera que puede predecir la intensidad de la señal a gran escala a distancias de varios kilómetros para sistemas de radio móviles tomando en cuenta que las antenas del sistema celular debe tener una altura mínima de 50 metros (Rappaport, 2002b).

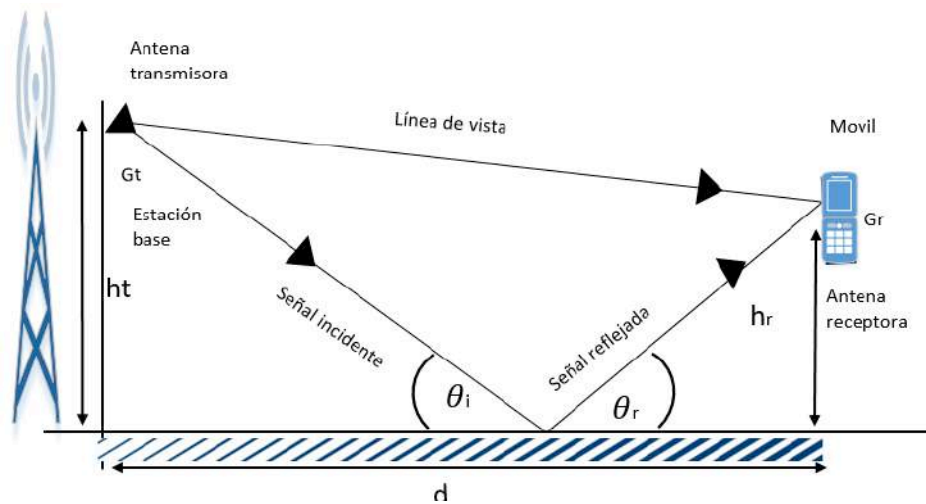


Figura 2: Modelo de reflexión de dos rayos, parámetros básicos.

Fuente: Elaboración propia

En condiciones perfectas los trayectos se consideran planos y con línea de vista teniendo de presente algunas decenas de kilómetros entre el transmisor y el equipo de recepción para las pruebas o cálculos pertinentes, para esto se utiliza de forma gráfica un esquema para entender los parámetros básicos por medio de la teoría de imágenes, como se aprecia en la figura 3, por medio de la descomposición de los trayectos en el plano reflejado para entender el modelo de dos rayos (Rappaport, 2002b).

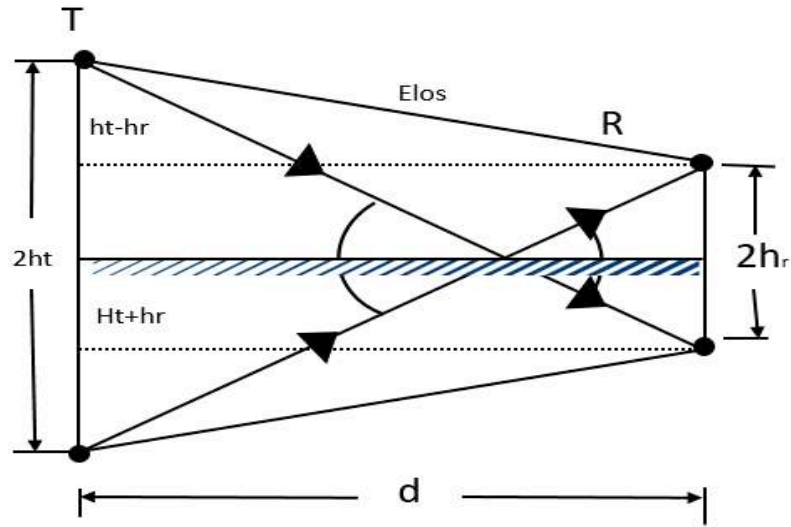


Figura 3. Método de imágenes: Cálculo de la diferencia de ruta entre la línea de vista y las rutas de reflexión por efecto del suelo.

Fuente: Elaboración propia

La potencia recibida a una distancia “*d*” desde un transmisor puede ser expresada con la ecuación 15, como:

$$Pr = Pt GtGr \frac{ht^2 hr^2}{d^4} \quad \text{Ecuación 15}$$

Se observa que, a grandes distancias  $d \gg \sqrt{h_t h_r}$ , por lo tanto, la potencia decrece por efecto de la distancia elevada a la cuarta potencia, a una velocidad de 40 dB por década. Situación que es más crítica si se compara con el prototipo básico de PEL.

En este tipo de modelo a medida que se aumentan los valores de *d*, la potencia recibida y la pérdida de trayectoria es independiente de la frecuencia (Rappaport, 2002b).

Las pérdidas del modelo se pueden expresar en decibeles (dB) mediante la siguiente expresión matemática:

$$PL(\text{dB}) = 40\log d - (10\log G_t + 10\log G_r + 20\log h_t + 20\log h_r) \quad \text{Ecuación 16}$$

#### 2.2.4. Modelo Longley-Rice

Mediante este modelo se puede predecir la atenuación en función continua de la distancia recorrida en el trayecto que se produce en las ondas de radio para enlaces de telecomunicaciones, según datos originales de los autores Anita Longley y Phil Rice, desarrollaron un algoritmo matemáticos que ayuda a las necesidades de planificación de frecuencias exclusivo para sistemas de comunicación punto a punto, en la banda de frecuencia desde 20 MHz hasta 40 GHz, para todo tipo de terreno, considera la geometría del perfil del terreno y la refractividad de la troposfera. En el cálculo utilizan los parámetros de: constante dieléctrica, conductividad terrestre, constante atmosféricas, tipos de clima, rango de frecuencias mencionadas anteriormente, la polarización de las antenas y la estadísticas de las intensidades de campos que se presentan para diferentes porcentajes de tiempo; ha sido utilizado en aplicaciones de software como: Nautel, Radio móvil, QRadioPredict, PahtLoss, Splat! y en TowerCoverage.com.

Cuando se analiza para la línea del horizonte se utiliza principalmente el modelo de reflexión en tierra plana, y las pérdidas por difracción para obstáculos aislados se determinan utilizando el modelo de “filo de cuchillo”. Cuando se realiza la predicción para difusiones troposféricas se utiliza la teoría de dispersión como lo detallan (Garcia et al., 2012). En la literatura técnica el modelo también se conoce como Modelo de Terreno Irregular (ITM = Irregular Terrain Model) y utiliza grandes bases de datos cuando se aplica en diferentes ambientes lo cual lo hace muy particular y útil.

Existen dos formas de utilizar el método Longley-Rice:

a) el modo de predicción punto a punto: cuando se obtiene toda la información completa y detallada de la descripción del perfil del terreno, esto permite la obtención de los parámetros de propagación específicos de la ruta de propagación y el modelo puede hacer una predicción con mayor exactitud;

b) el modo de predicción de área: en este caso no se dispone del perfil del terreno, a lo cual el método dispone de la técnica para estimar los parámetros específicos.

En la predicción de la potencia recibida en un trayecto o vano cuando existe línea de vista (LOS) se utiliza principalmente el modelo de reflexión terrestre de 2 rayos y las pérdidas por difracción por obstáculos aislados son estimados utilizando el modelos de “filo de cuchillo” de Fresnel-Kirchoff (Rappaport, 2002a).

A éste modelo se le han hecho varias modificaciones y correcciones desde su publicación (1968), siendo una de las más importantes la relacionada con la propagación en zonas urbanas, una de las mejoras que se le han introducido a este método es el nuevo factor llamado factor urbano (FU) para referirse a la atenuación por efecto de los obstáculos que se presentan antes de llegar a la antena receptora (Parsons, 2000), también en el caso del software Radio móvil (Radiomobile) la inclusión de mapas digitales para mejorar la representación de forma gráfica con gran exactitud para el diseño de los enlaces.

La desventaja del modelo radica en que no provee una forma de determinar correcciones debido a factores ambientales en las proximidades del receptor, el efecto de las pantallas difractantes, arboles, vehículos entre otros; tampoco determina el efecto de la multi trayectoria de las ondas electromagnéticas.

### 2.2.5. Modelo de Durkin

Es un modelo semi determinístico híbrido entre el método Bullington y el método Epstein-Peterson es un enfoque de predicción de la propagación similar al utilizado por Longley-Rice que fue discutido por Edwards y Durkin, quienes utilizaron un simulador en un computador logrando predecir los niveles de potencia en terrenos de tipo irregular, que más tarde fue adoptado por el Comité de Radio Común (JRC) en el Reino Unido, para implementar los servicios de cobertura de radio móvil con gran estimación y precisión. La utilidad del modelo radica en la facilidad de predicción de las pérdidas obtenidas ocasionadas por los obstáculos en una trayectoria de radio sobre la naturaleza de los fenómenos en terrenos irregulares (Rappaport & Sandhu, 2002).

La funcionalidad del algoritmo se divide en dos partes:

Por una parte se consulta la base de datos topográfica de un servicio de área propuesto y se reconstruye la información del perfil del terreno entre el transmisor y al receptor. En el proceso de la simulación se modelan los fenómenos a gran escala de acuerdo a la ruta de trayectoria establecida, se asume que la antena receptora recibe toda la energía de un solo haz radial en línea de vista incluyendo el fenómeno de difracción y no tiene presente el efecto de la multi trayectoria (dispersión, reflexión, entre otras).

Por otra parte, el algoritmo de simulación calcula la pérdida de trayectoria esperada a lo largo de ese radial. Una vez hecho esto, la ubicación del receptor simulado se puede mover iterativamente a diferentes ubicaciones en el área de servicio para deducir el contorno de intensidad de la señal

Existe una clasificación particular cuando se presenta línea de vista (LOS), con Línea de vista parcial al incluir el efecto de la zona Fresnel obstruida y sin línea de vista, bajo estas premisas se realiza una clasificación por categorías y se evalúan condiciones cuando se presenta:

- a) Refracción simple en una esquina.
- d) Refracción en dos esquinas
- c) Refracción en tres esquinas
- d) Múltiples esquinas

Además, necesita datos geográficos del terreno y cuando se presentan varias obstrucciones el método se reduce al método de Bullington.

El modelo es muy práctico ya que usa bases de datos topográficos y referencia la información de cada elemento de la matriz correspondiente en un punto en un mapa de área de servicio, mientras que el contenido real de cada elemento de la matriz contiene los datos de elevación sobre el nivel del mar, como se muestra en la **Figura 4**. Estos tipos de modelos digitales de elevación (DEM) están disponibles en el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). El perfil del plano lo reconstruye el programa al cuantificar las alturas del área de servicio a lo largo del radial que une el sistema de transmisor y el equipo receptor (Rappaport, 2002a).

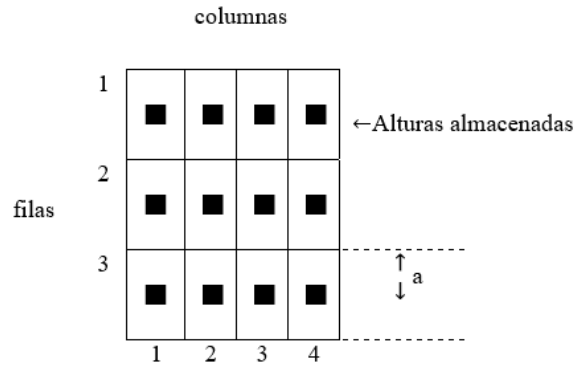


Figura 4. Matriz bidimensional de información de elevación adaptado de (Rappaport, 2002b).  
Fuente: (Rappaport, 2002b).

Si se realiza el análisis radial para hallar los puntos discretos obtenidos de la matriz es posible que no se pueda pasar por dichos punto, por tanto se debe utilizar análisis numérico mediante el método de interpolación lineal diagonal para calcular las alturas aproximadas que posiblemente se observan al mirar a lo largo del radial, como se aprecia en la figura 5 (a); que es el resultado de la parametrización obtenida de la figura 4 como una cuadrícula topográfica con ubicaciones arbitrarias de transmisor y receptor, en la figura 5 (b) también observa cómo es el perfil de terreno radial típico reconstruido mediante interpolación diagonal, adaptado de (Rappaport, 2002b)

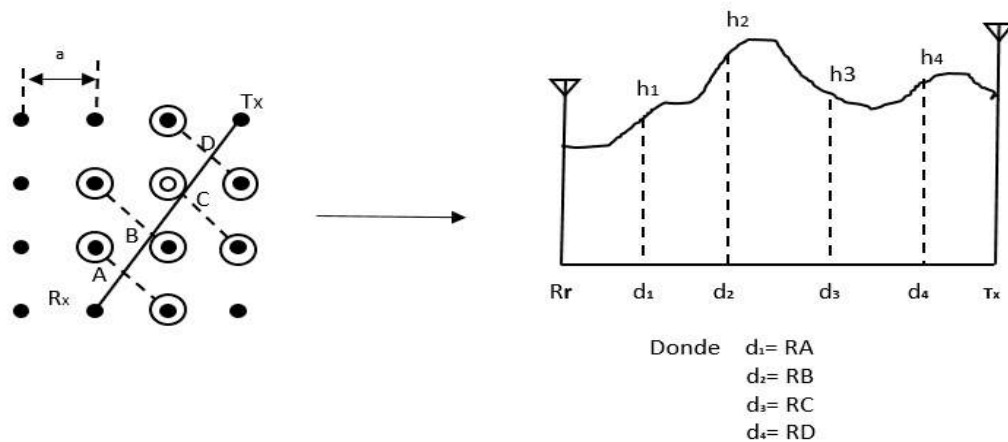


Figura 5. Perfil de terreno radial. (a) Vista superior del mapa interpolado entre el Tx y Rx (b) Perfil de terreno obtenido por interpolación entre Tx y Rx.  
Fuente: (Rappaport, 2002b).



El algoritmo no es una rutina de valores que haya por interpolación los datos de forma directa, es un proceso que resulta de la obtención de un promedio de las alturas obtenidas por métodos de interpolación diagonales, verticales (filas) y horizontales (columnas) a medida que va calculando el promedio de cada apunto del perfil del plano construido a medida que va recorriendo los punto de la trayectoria en línea de vista. El resultado de las rutinas de interpolación al final genera la matriz de distancias desde el receptor y las alturas correspondientes a lo largo del radial. Pero el algoritmo presenta el problema de reducir el cálculo del enlace punto a punto unidimensional, entonces se recurre a la utilización de las técnicas de difracción con borde de cuchillo como se describió anteriormente para calcular la pérdida de trayecto utilizando (Rappaport, 2002a).

#### **2.2.6. Modelo Okumura Hata**

Es un método establecido por Masaharu Hata en 1980 que tomó como base, los trabajos realizados de los resultados de las campañas de medidas realizadas por Yoshihisa Okumura en la ciudad de Tokio en Japón; utiliza sistemas de ecuaciones para calcular las pérdidas de propagación es un referente para la planificación y dimensionamiento de enlaces de radio propagación.

El trabajo original de Okumura consistió en obtener un conjunto de curvas sobre el nivel de atenuación media relativa en el espacio libre, analizando la frecuencia, la distancia, las altura de las antenas de las radio base y la estación móvil e incluyó factores de corrección específicos en tablas de acuerdo a diferentes tipos de ambientes: urbana, semi urbana y rural, para diferentes tipos de trayecto.

El modelo Okumura-Hata se utilizó inicialmente en ambientes urbanos para el rango de frecuencias entre 150 MHz a 1920 MHz para distancias desde 1 a 100Km. Utiliza antenas con alturas desde 30m hasta 100m y alturas de antenas móviles o vehiculares de 1m hasta 10m.

Las curvas aplicadas se observan en la figura 6 para diferentes tipos de terreno donde se especifica la atenuación media en el espacio libre  $A_{mu}$  o  $A_{exc}$  y el factor de corrección (Garea) en la figura 7, aplicada en una área urbana sobre un terreno casi liso con una altura eficaz de la antena de la radio base ( $h_b$ ) ubicada a 200m y una altura de la antena móvil ( $h_m$ ) de 3m (Rappaport, 2002b) .

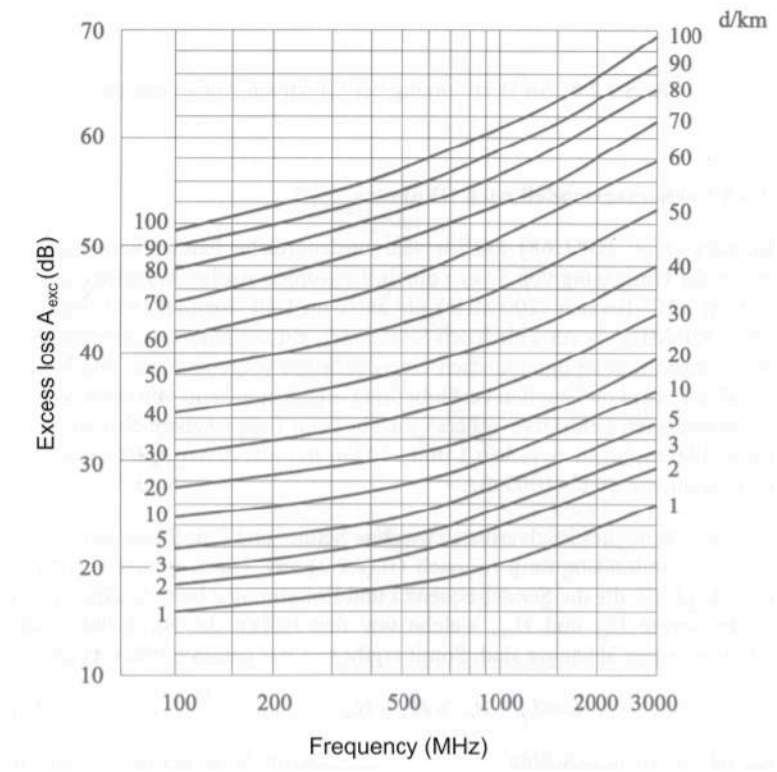


Figura 6. Tabulación relativa de la atenuación media modelo Okumura ( $A_{mu}$  (f, d)).

Fuente:(Rappaport, 2002b).

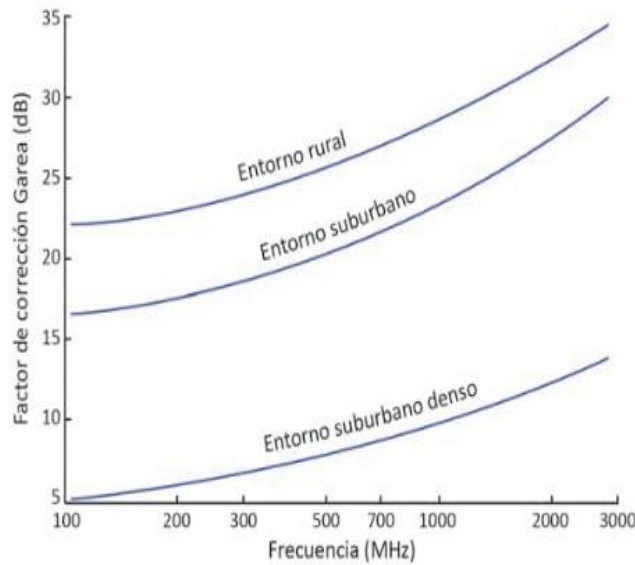


Figura 7. Factor de corrección modelo Okumura para diferentes ambientes de propagación Fuente:(Gómez, G; Catellanos, 2016)

El factor de corrección introducido por Okumura dependiendo del tipo de terreno, permitió determinar las pérdidas por trayectoria en el espacio con más exactitud, para el cual propuso la expresión 17:

$$L_{50}(dB) = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{t\epsilon}) - G(h_{r\epsilon}) - G_{AREA} \quad \text{Ecuación 17}$$

Definimos:

$L_{50}$  50% del valor (mediana) de las pérdidas por trayectoria.

$L_F$  Pérdidas por propagación en el espacio libre

$A_{mu}$  Atenuación media relativa representada en las curvas (se obtiene de la **figura 6**)

$G(h_{t\epsilon})$  Factor de ganancia de la altura de la antena transmisora de la radio base se

establece para

$$G(h_{te}) = 20 \log\left(\frac{h_{te}}{200}\right) \quad \text{Para } 30\text{m} < h_{te} < 1000\text{m}$$

$G(h_{re})$  Factor de ganancia de la altura de la antena móvil en recepción.

$$G(h_{re}) = 10 \log\left(\frac{h_{re}}{3}\right) \quad \text{Para } h_{re} < 3\text{m}$$

$$G(h_{re}) = 20 \log\left(\frac{h_{re}}{3}\right) \quad \text{Para } 3\text{m} < h_{re} < 10\text{m}$$

$G_{AREA}$  Ganancia dependiendo del ambiente (se obtiene de la **figura 7**)

El procedimiento de Okumura es muy sencillo y permite realizar la predicción de pérdidas por trayectoria para el diseño de celdas o células móviles, sus fuentes son las bases de datos de las mediciones en campo, por tanto no introduce una explicación analítica, característica que si analizó Hata e introduce una variable nueva de corrección por altura efectiva del móvil que es dependiente de la zona de cobertura, esto le permitió definir diferentes valores para diferentes ambientes.

Una característica especial del modelo de Hata es que inicialmente se utilizó para distancias de hasta un kilómetro, no incluye correcciones específicas para distintas rutas o ambientes de propiciación situación que si utilizó Okumura, por tanto, puede considerarse desventaja la lenta respuesta a cambios drásticos en el terreno, pero es una formulación numérico empírica bastante aceptable para áreas urbanas y suburbanas, pero no tanto en áreas rurales; normalmente se acepta un estándar de perdidas entre el 10 dB a 14dB en las predicciones de las perdidas por trayectoria.

Para Hata la caracterización de las medidas se realizan en cuatro tipos de terreno:

Área Urbana Alta: Zona con alta presencia de un gran número de edificios con alturas mayores a 15 metros y calles considerablemente anchas.

Área Urbana Media: Área que se distingue por la existencia de edificios con alturas menores a 15 metros.

Área Suburbana: Presencia de densidad alta de árboles y altura máxima de 6m en edificios.

Área Abierta: Esta zona corresponde a un terreno rural o casi plano.

Las consideraciones técnicas más importantes de acuerdo a (Andreas, 2011) para el modelo Hata son:

a) Pérdida por propagación y fórmula empírica

Si  $A_{eff}$  es la sección de cruce de absorción de una antena isotrópica y  $P_u$  la densidad de potencia recibida, la potencia de recepción está definida por la ecuación 18:

$$P_r(dBm) = P_u(dBm/m^2) + 10 \log_{10}(A_{eff}) \quad \text{Ecuación 18}$$

También se establece que:

$$A_{eff} = \lambda^2/4\pi. \quad \text{Ecuación 19}$$

$$P_u(dBm/m^2) = E(dB\mu V/m^2) - 10 \log_{10}(120\pi) - 90 \quad \text{Ecuación 20}$$

Por tanto, la pérdida de propagación  $L_p$  (dB), se obtiene del valor de la diferencia entre la potencia radiada  $P_t$  y la potencia recibida (ERP)  $P_r$ . Y se expresa con la ecuación 21.

$$\therefore L_p(\text{dB}) = P_t(\text{dBW}) - E\left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}\right) + 10 \log_{10}(\lambda^2/4\pi) + 115.8 \quad \text{Ecuación 21}$$

Okumura estableció en las tablas los valores de la fuerza de campo recibido a  $1\text{kw ERP/dipolo}$ , es necesario transformar el valor de la Potencia Efectiva Radiada de una antena Isotrópica (PIRE), esto es, se le suma la ganancia de antena entre la antena isotrópica y la antena dipolo. Como el valor de la ganancia de antena es 2.2dB, se tiene la ecuación 22:

$$P_t = (\text{dBW EIRP}) = P'_t\left(\text{dBW ERP/dipolo}\right) + 2.2 (\text{dB}) \quad \text{Ecuación 22}$$

Tomando en cuenta que  $P'_t$  es  $1\text{kW (ERP/dipolo)}$ , el valor  $P_t(\text{dBW EIRP})$  es 32.2 dB.

Para calcular las pérdidas por propagación entre antenas isotrópicas, se utilizan las curvas de predicción de las figuras 6 y 7 y se aplica la ecuación 23.

$$L_p(\text{dB}) = 148 - 10 \log_{10}(\lambda^2/4\pi) - E\left(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}\right) \quad \text{Ecuación 23}$$

b). Fórmula empírica para las pérdidas por propagación

De la figura 8 se obtienen los datos de pérdidas de propagación en un área urbana sobre un terreno casi liso, de la intensidad de campo básica con respecto a la magnitud del campo eléctrico  $E$ , en función de la distancia  $R(Km)$  para obtener la expresión 24:

$$E(dB\mu V/m) = \gamma + \beta \log_{10} d \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:  $\gamma$  y  $\beta$  son constantes determinadas por  $h_b(m)$  y  $f_c (MHz)$

Por definición la ecuación estándar para pérdidas de propagación está dada por:

$$L_p(dB) = A + B \log_{10} d \quad \text{Ecuación 25}$$

Al realizar los reemplazos y sustituciones, Hata finalmente obtiene la ecuación estándar para las pérdidas de propagación es:

$$A = 148 - 10 \log_{10}(\lambda^2/4\pi) - \gamma + a(h_{rx}) \quad \text{Ecuación 26}$$

$$B = -\beta \quad \text{Ecuación 27}$$

Se establece que:

$a(h_{rx})$  Factor de corrección

$h_m(m)$  Es la altura de la estación vehicular, pero en las curvas básicas  $h_{rx} = 1.5 m$ .

Las curvas básicas de la Figura 8 se analizan para 900MHz y una altura del móvil  $h_{rx}$  es 1.5 m, por lo tanto, es conveniente tomar  $a = 0dB$  e introducir el factor de corrección sólo para alturas de antena vehicular o móvil diferentes.

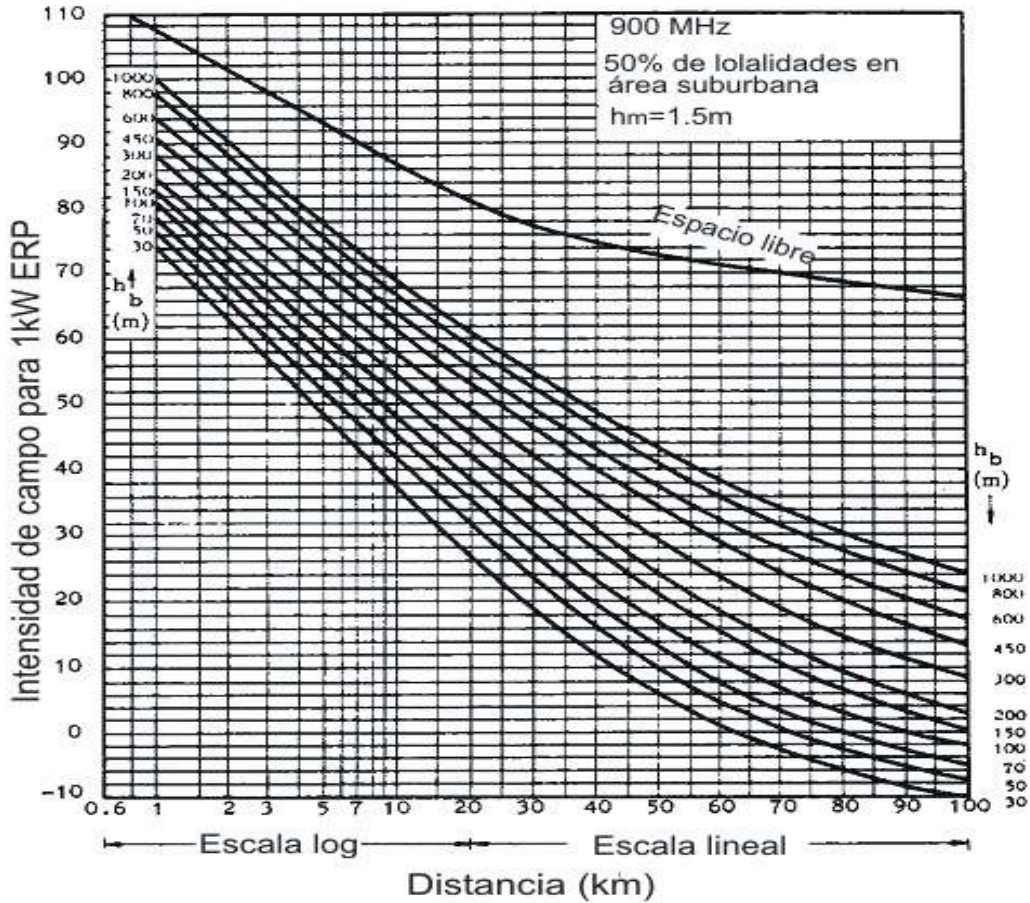


Figura 8. Intensidad de campo versus distancia para área suburbana.  
Fuente (Rappaport, 2002b).

El valor de  $A$  se obtiene de acuerdo a la magnitud del campo  $E$  y  $B$  por la pendiente de la magnitud del campo, referenciado en las tablas 4 y 5, que indican los valores tomados de las curvas básicas de magnitud en campo (Stüber, 2017).



De la tabla 4 se infiere que:

1) En cada frecuencia  $f_c$  (MHz),  $A$  decrece dos por dos contra el incremento logarítmico  $h_{tx}$  (m).

2) Cuando  $f_c$  llega a ser  $n$  veces tan grande para el arreglo de  $h_{tx}$ ,  $A$  aumenta en proporción de  $\log n$ . De acuerdo a lo anterior, los valores de  $A$  se obtiene en función de la siguiente expresión:

$$A = \alpha - 13.82 \log_{10} h_{tx} - a(h_{rx}) \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\alpha = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c \quad \text{Ecuación 29}$$

Tabla 4: Tabla con valores de A

	$f_c$ (Mhz)			
$h_{tx}$ (m)	150	450	900	1500
30	105.5	117.0	124.5	132.0
50	103.0	114.0	122.5	129.5
70	101.0	112.0	120.5	127.0
100	98.5	110.0	118.0	125.0
150	96.5	108.0	116.5	123.0
200	94.5	106.0	114.5	121.0

Fuente (Rappaport, 2002b).

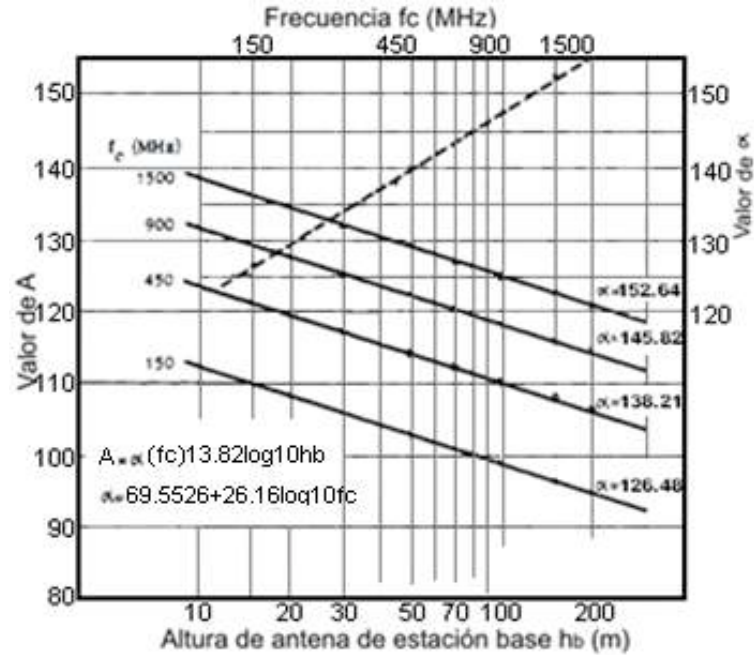


Figura 9. Factor A. Fuente (Rappaport, 2002b).

Para la tabla 5, se observa que:

B es casi independiente de  $f_c$ .

Disminuye constantemente mientras el logaritmo de  $h_{tx}$  se incrementa.

Los valores de B se obtienen de la figura 10 con respecto al valor significativo en cada  $h_{tx}$ , llega a ser casi una línea recta y se representa por la ecuación 30:

$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10} h_{tx} \quad \text{Ecuación 30}$$

Tabla 5: Valores de BFuente: (Rappaport, 2002b).

$h_{tx}(m)$	$f_c (Mhz)$			
	150	450	900	1500
30	35.0	35.0	35.7	35.7
50	33.4	34.1	33.8	34.1
70	33.2	32.5	32.2	33.4
100	31.5	31.3	31.3	32.2
150	30.4	30.4	30.4	30.9
200	29.9	29.4	29.4	29.9

Fuente: (Juárez & Velásquez, 2013).

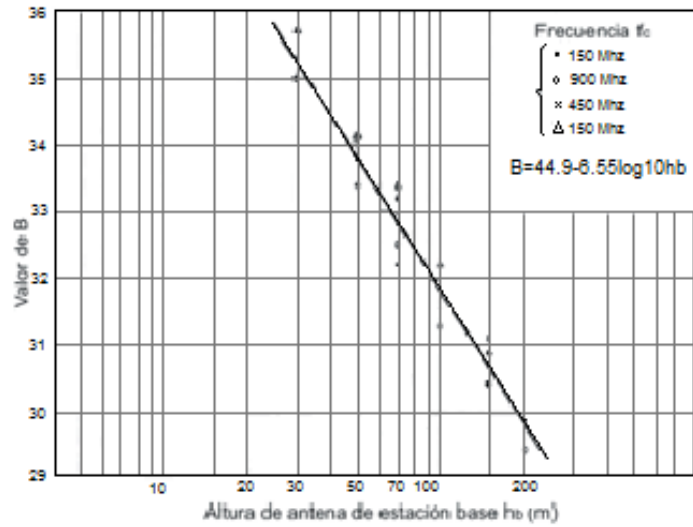


Figura 10. Factor B.

Fuente: (Juárez & Velásquez, 2013).

La fluctuación máxima es de  $\pm 0.5$  y se presenta como un error de aproximación lineal alrededor de  $B$ . De esta forma se obtiene la fórmula estándar para las pérdidas de propagación:

$$L_p(dB) = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_{tx} - a(h_{rx}) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_{tx}) \log_{10} d \quad (dB) \text{ Ecuación 31}$$

La descripción de las variables en la ecuación es:

$f_c$  = Frecuencia portadora (150 MHz a 1500 MHz)

$h_{tx}$  = Radio base (Altura de antena transmisora 30 – 200m)

$a_{rx}$  = Factor de corrección para la altura efectiva de la antena móvil, la cual es una función del tipo de área de cobertura.

$d$  = Distancia entre transmisor y receptor (1 – 20Km).

Para el análisis en detalle, Hata discrimina los diferentes tipos de zonas o ambientes para el cálculo de las pérdidas por propagación variando el factor de corrección  $a(h_{rx})$  de la ecuación anterior como fórmula estándar para medir las pérdidas de propagación en un área urbana es:

$$L_p(dB) = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_{tx} - A(h_{rx})^* + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_{tx}) \log_{10} d \quad (dB) \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

$f_c$  Frecuencia portadora

$h_{tx}$  Efectividad para la altura de la antena de la Radio base

$A_{hrx}$  Factor de corrección para la altura efectiva de la antena móvil, la cual es una función dependiente del área de cobertura.

$d$  Distancia entre transmisor y receptor (Km)

b) Factor de corrección  $A(h_{rx})$  \*

Dependiendo del tipo de ciudad a analizar, Hata presentó además curvas de corrección para alturas de antena receptora  $h_{rx}$ , diferentes a 1.5 metros (Juárez & Velazquez, 2013).

Ciudades urbanas altas

Las modificaciones para las curvas de predicción para una ciudad urbana alta se observan en la figura 11.

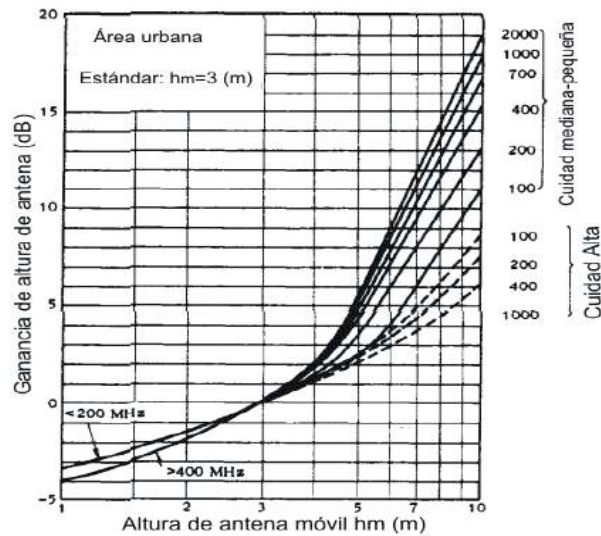


Figura 11. Curvas de predicción para ganancias de altura de antena vehicular en un área urbana. Fuente: (Juárez & Velazquez, 2013).

Ciudades pequeñas y medianas

Las modificaciones para las curvas de predicción para una ciudad mediana-pequeña se observan en la figura 12.

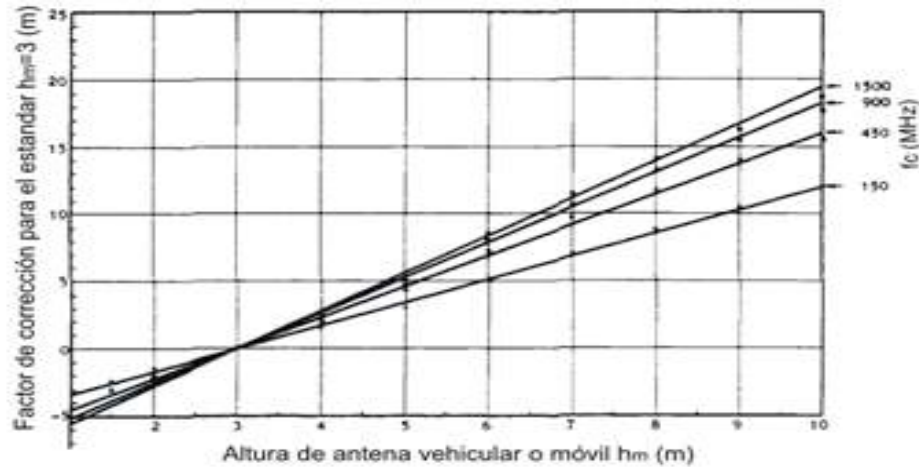


Figura 12. Factor de corrección para una ciudad mediana-pequeña.

Fuente: (Juárez & Velazquez, 2013).

La ecuación estándar para el cálculo del factor de corrección en este tipo de ciudad es (Saunders & Aragon, 2018):

$$A(h_{rx}) = (1.1 \log_{10}(f_c) - 0.7) * h_{rx} - (1.56 \log_{10}(f_c) - 0.8) \quad \text{Ecuación 33}$$

Cuyos parámetros son:

$f_c$  Frecuencia portadora (150Mhz a 1500Mhz)

$h_{rx}$  Altura del móvil (antena receptora 1 – 10m)

De la figura 1.7, se observa que el error de aproximación lineal es proporcional a la frecuencia y aproximadamente 1.0 dB cuando  $f_c = 1500Mhz$ .

Ciudades altas o grandes

En este tipo de ciudad, las curvas de corrección están dadas por líneas acotadas de la figura 11, pero en este caso se considera dicho factor de corrección, pero se acota para dos tipos de frecuencias, así:

$$f_c \leq 200\text{Mhz}$$

$$a(h_{rx}) = 8.9(\log_{10} 1.54h_{rx})^2 - 1.1 \quad \text{Ecuación 34}$$

$$f_c \geq 400\text{Mhz}$$

$$a(h_{rx}) = 3.2(\log_{10} 11.75h_{rx})^2 - 4.97 \quad \text{Ecuación 35}$$

Para identificar este tipo de ciudades es importante tomar en cuenta la altura de los edificios, los cuales deben ser mayores a 15m.

d). Correcciones para las áreas suburbanas y abiertas (rurales)

De acuerdo al método de predicción de Okumura, el factor de corrección  $A(h_{rx})$  para un área suburbana (al tomarla  $K_r(dB)$  de la figura 13), es la diferencia entre la fuerza del campo mediano en un área urbana y una suburbana, en la figura 13, se muestra por una línea acotada.

$$K_r(dB) = 2\{\log_{10}(f_c/28)\}^2 + 5.4 \quad \text{Ecuación 36}$$

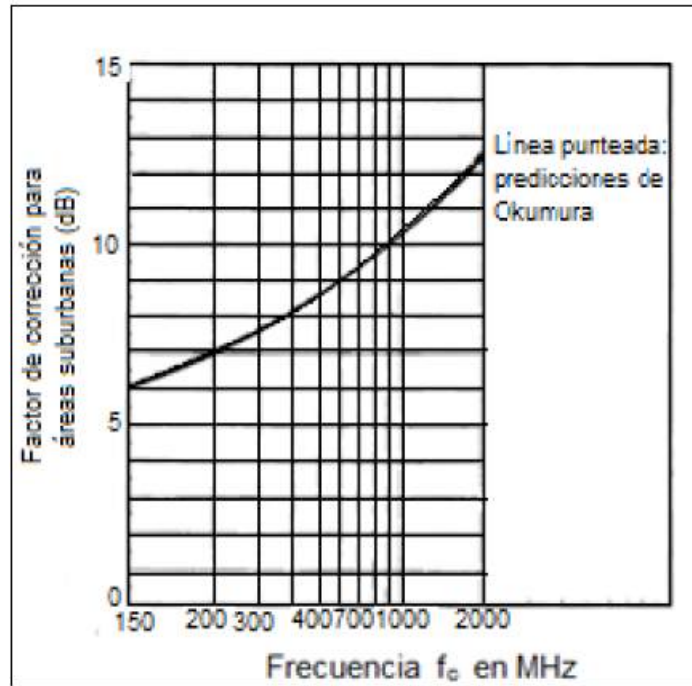


Figura 13. Factor de corrección para área suburbana.

Fuente: (Juárez & Velazquez, 2013).

Para obtener las pérdidas de propagación en un área suburbana, se resta el factor  $K_r(dB)$  a la ecuación (1.26), de este modo la fórmula estándar del Modelo Hata es:

$$L_{as}(dB) = L_{p(área\ urbana)} - 2 \left\{ \log_{10} \frac{f_c}{28} \right\}^2 - 5.4 \quad (dB) \quad \text{Ecuación 37}$$

El factor de corrección  $Q_r(dB)$ , que se asocia al término  $A(h_{rx})^*$  está dado por la línea discontinua de la figura 14 para áreas abiertas (rurales), de manera similar al caso anterior, se resta este factor a la ecuación (1.33) de donde se obtiene:

$$L_{aa}(dB) = L_{p(área\ urbana)} - 4.78(\log_{10} f_c)^2 + 18.33(\log_{10} f_c) - 40.94 \quad (dB) \quad \text{Ecuación 38}$$



Este modelo es usado para células grandes en sistemas de comunicaciones móviles, pero no para Sistemas de Comunicación Personal (PCS) los cuales manejan celdas con un radio de alrededor de 1Km (Stüber, 2017).

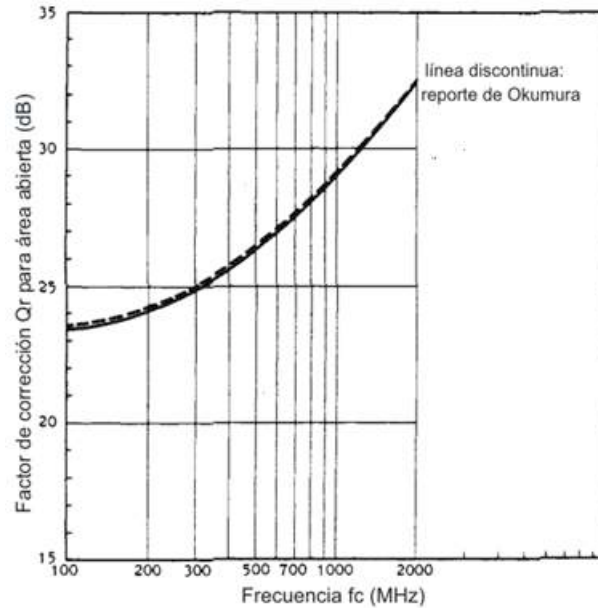


Figura 14. Factor de corrección para área abierta.

Fuente (Juárez & Velazquez, 2013).

### 2.2.7. Modelo Walfish-Bertoni

El modelo formulado por Walfish-Bertoni, llamado también como modelo de pantallas difractante, es un modelo semi determinista válido para situaciones de alturas y espaciamentos de construcción uniformes (Bayram, 2014). Este modelo considera el efecto de la altura y los techos de las edificaciones utilizando modelos de difracción para predecir la potencia media de la señal a nivel de las calles, no considera LOS entre el transmisor y el receptor, la expresión matemática toma en cuenta que (Alonso et al., 2013) la altura de la antena de la radio base se ubica por encima del nivel medio de los edificios. Las frecuencias de

trabajo del modelo oscilan entre los 300Mhz a 3Ghz para distancias de 0,2 Km a 5Km de separación entre el transmisor y el receptor.

La principal característica del modelo es la estimación de pérdidas de potencia en ambientes urbanos basado en la difracción de la señal que se origina sobre el techo de los edificios. La figura 15 es la representación descriptiva del modelo, las pérdidas se calculan a partir de la ecuación 39 (Garcia et al., 2012):

$$L(dB) = 57,1 + A + \log f + 18 \log(d) - 18 \log(h_{eb} - h_{edi}) - 18 \log \left[ 1 - \frac{d^2}{17(h_{eb} - h_{edi})} \right] \quad \text{Ecuación 39}$$

La influencia de los edificios se representa con la variable A con la siguiente ecuación:

$$A = 5 \log \left[ \left( \frac{b}{2} \right)^2 + (h_{edi} - h_m)^2 \right] - 9 \log b + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{2(h_{edi} - h_m)}{b} \right] \right\} \quad \text{Ecuación 40}$$

Teniendo en cuenta que  $h_{edi}$  es la altura de los edificios,  $h_{eb}$  es la altura de la estación base,  $w$  es el ancho de la calle,  $h_m$  la altura del móvil,  $d$  la distancia desde la estación base hasta el móvil y  $b$  es la distancia de separación entre los edificios, todos estos parámetros se expresan en metros.

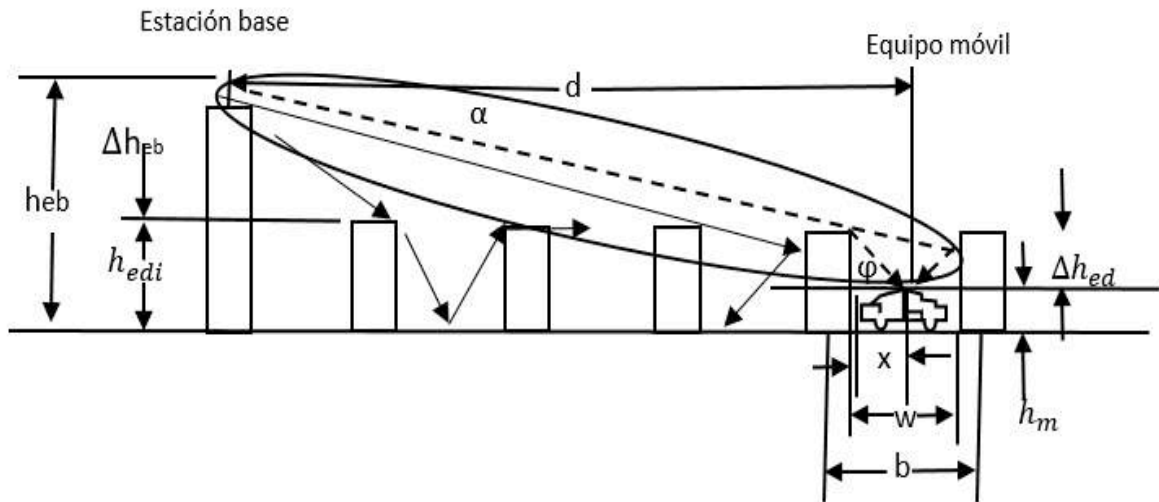


Figura 15: Geometría de la difracción de la cubierta.  
Fuente: tomado de (Parsons, 2000)

El modelo proponen un cálculo teniendo en cuenta los edificios para ángulos  $\alpha$  pequeños, mediante la integración de las ecuaciones de Huygens-Kirchhoff para una serie de pantallas finas que son producidas por los edificios, al final se suman las contribuciones de las múltiples difracciones producidas por las pantallas de las edificaciones uniformes durante todo el trayecto, el modelo explica la variación de la potencia con respecto a la distancia donde se realizaban las mediciones (Walfisch & Bertoni, 1988)

### 2.2.8. Modelo Ikegami

Es un modelo empírico utilizado para realizar la predicción de sistemas celulares micro celdas de corto alcance para telefonía en ambientes urbanos, también es útil para predicciones de sistemas inalámbricos que trabajan en las bandas UHF y SHF, se basa en la teoría geométrica de rayos e intenta producir una predicción totalmente determinista de las intensidades de campo a puntos específicos.

Este modelo toma en cuenta las dos contribuciones del primer rayo difractado y el segundo rayo reflejado. De manera que, como lo caracteriza (Saunders & Aragon, 2018) la difracción se calcula utilizando una aproximación de un solo borde en el edificio más cercano al móvil, y se supone que la pérdida de reflexión de las paredes se fija en un valor constante. Los dos rayos (reflejados y difractados) se suman para determinar la potencia que proviene del rayo directo, como se observa en la **figura 16** el resultando de las pérdidas se representa con la ecuación:

$$L(R) = 10 \log f + 10 \log(\sin\phi) + 20 \log(h - hr) - 10 \log w + \\ + 20 \log \left\{ 1 + \left[ \frac{3}{Lr^2} \right] \right\} - 5,8 \quad \text{Ecuación 41}$$

Donde:

$f$ : frecuencia en Mega Hertz MHz,

$\phi$ : ángulo entre la calle y la línea directa de la base al móvil

$Lr$ : pérdida de reflexión y típicamente se asume como 0,25

$h$ : altura media de los edificios circundantes, en metros

$h_r$ : altura del móvil

$w$ : ancho de la calle, en metros

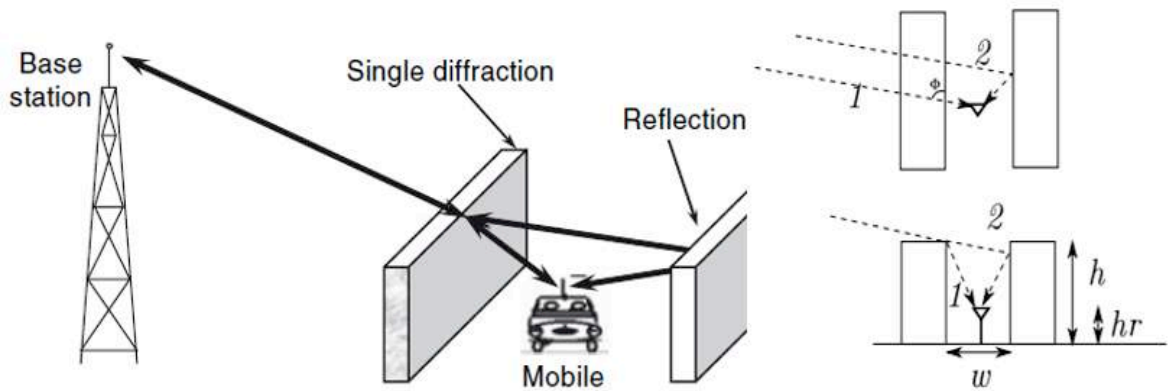


Figura 16. Interpretación física del modelo.

Fuente: tomado de (Saunders & Aragon, 2018)

El análisis acepta que el dispositivo móvil se ubica en el centro de la calle, como se muestra en la **figura** anterior. Además, asume que el ángulo de elevación de la estación base desde la parte superior del borde de filo de cuchillo es insignificante en comparación con el ángulo de difracción hasta el nivel del móvil, por lo que no hay dependencia de la altura de la estación base.

### 2.2.9. Modelo Walfisch-Ikegami

Es el resultado de la fusión de los modelos de J. Walfisch y F. Ikegami, el estudio es de tipo empírico fue desarrollado y mejorado años siguientes, para transformarse en el denominado COST- Walfisch- Ikegami. La precisión del modelo es bastante alta porque en los entornos urbanos, especialmente la propagación sobre los tejados es la parte más dominante. Este modelo empírico considera solamente los edificios en el lugar vertical entre el transmisor y el receptor (Sati, Govind; Singh, 2014).

Normalmente examina el rango de frecuencias de 800 a 2000MHz, la altura del transmisor ( $h_{tx}$ ) es de 4 a 50m, la altura del receptor ( $h_{tr}$ ) es de 1 a 3m y la distancia ( $d$ ) entre el transmisor y el receptor.

Las dos situaciones sobre las que trabaja el modelo son:

1.- En presencia de línea de vista entre las antenas:

$$L_p(dB) = 42,6 + 26 \log(d)_{km} + 20 \log(f)_{Mhz} \quad \text{Ecuación 42}$$

2.- Cuando no hay línea de vista:

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad \text{Ecuación 43}$$

Dónde:

$L_0$  = Pérdidas por el espacio libre.

$L_{rts}$  = Pérdidas por difracción de multiples esquinas de los techos de los edificios

$L_{msd}$  = Pérdidas debido a una única difracción final cuando la onda se propaga hacia la

calle.

El valor de  $L_p$  puede llegar a ser mínimo de  $L_0$  cuando  $L_{rts} + L_{msd} \leq 0$ . La determinación de  $L_{rts}$  se basa en el modelo Ikegami junto con el ancho de las calles y la orientación de estas con respecto a las antenas transmisoras (Bhuvaneshwari et al., 2016), como se observa las ecuaciones no se desarrollan por completo en este numeral, ya que será estudiado en detalle con la fusión que hacen dicho modelo y lo convierten en COST231-Walfish-Ikegami.

### 2.2.10. Modelo Cost-231 o Cost-231 Hata

Esta representación matemática se utiliza para las bandas de 800 MHz y 900 MHz para los sistemas móviles celulares, debido al surgimiento de los sistemas de comunicación personal que utilizan la banda de 1800 MHz y 1900 MHz, el modelo Hata fue modificado por la European Cooperativa Europea para la Investigación Científica y Técnica (COST) para utilizar y mejorar los resultados de las tablas y las curvas obtenidas por Okumura en el rango de frecuencias entre los 1500 MHz y 2000 MHz con el fin de implementar el sistema GSM1800 en Europa, se allí surge el nombre de COST-231 Hata (Sati, Govind; Singh, 2014).

Es un modelo semi-empírico de predicción de pérdidas para trayectos que trabajan en la frecuencia de 900 MHz a 2000 MHz, se utiliza en ambientes urbanos y suburbanos, tiene una diferencias de 3dB con respecto al modelo Hata debido a la corrección del porcentaje que tiene en cuenta las construcciones. Si el terreno usado tiene diferente porcentaje de construcciones, la diferencia aumentaría o disminuiría dependiendo del terreno.

Sin embargo, cuando el estudio se hace para un área abierta y suburbana, el modelo de Hata Modificado se desvía mucho más del modelo Hata-Cost 231. Todos estos resultados significan que el modelo Hata-Cost 231 concuerda muy bien con las Curvas de Okumura en Área Urbana (Bhuvaneshwari et al., 2016).

Este modelo es válido solo si se cubren los siguientes requerimientos:

Su frecuencia ( $f$ ) de operación debe de estar comprendida entre 150 MHz y 2000 MHz.

La altura de la antena de la estación base ( $hb$ ) debe de estar comprendida entre 30 m y 200 m.

La altura de la antena de la estación móvil ( $h_m$ ) debe de estar comprendida entre 1 m y 10 m.

La distancia ( $d$ ) existente entre la estación base y la estación móvil debe de ser de entre 1 Km. y 20 Km.

El modelo COST231-Hata se basa en extender el modelo Okumura-Hata para su uso en el rango de frecuencias de 1500 MHz a 2000MHz, donde se sabe que el modelo Okumura-Hata subestima las pérdidas de trayecto.

Las pérdidas de trayecto previstas por el modelo de COST231-Hata (Stüber, 2017) se determinan con la siguiente expresión:

$$P_{L0(\text{urbano})} = 46.3 + 33.9 \log 10f - 13.82 \log 10_{h_b} - (a_{h_m}) - (44.9 - 6.55 \log 10_{h_b}) \log 10d + c_f$$

Ecuación 44

Asumiendo que:

$PL$  son las pérdidas y se expresa en dB.

$h_b$  = altura de la antena de la estación base metros.

$f$  = frecuencia de operación del sistema a estudiar en MHz

$h_m$  = altura de la antena de la estación móvil metros.

$C_f$  = factor de corrección para tomar en cuenta el ambiente de propagación.  $C_f = 0$  para ciudad media y zonas suburbanas con una densidad de árboles moderada y  $C_f = 3$  para centros metropolitanos



$a(h_m)$  = factor de corrección de la altura de la antena de la estación móvil en dB.

Se establece una división del factor de corrección de la altura de la antena de la estación móvil  $a(h_m)$  cuando se caracteriza el ambiente bajo las siguientes condiciones:

Para ciudades pequeñas o medianas

$$a_{(hm)} = (1.1 \log f - 0.7)h_m - (1.56 \log f - 0.8) \quad \text{Ecuación 45}$$

En esta ecuación  $a$  se mide en dB y  $h_m$  toma valores entre 1 metro y 10 metros.

Para ciudades grandes

$$a_{(hm)} = 8.29 (\log 1.54hm)^2 - 1.1 \quad \text{Ecuación 46}$$

Válida para frecuencias menores a 300 MHz.

$$a_{(hm)} = 3.2 (\log 11.75hm)^2 - 4.97 \quad \text{Ecuación 47}$$

Esta formulación es válida para frecuencias superiores a 300 MHz para ambientes suburbanos o rurales y  $a_{(hm)}$  se mide en dB.

Para zonas suburbanas:

$$P_{L(sub)} = P_{L0(urbana)} - 2 \left[ \log \frac{f_c}{28} \right]^2 - 5.4 \quad \text{Ecuación 48}$$

Para zonas abiertas:

$$P_{L(abi)} = P_{LO(urbana)} - 4.78[\log f_c]^2 + 18.33 \log f_c - 40.94 \quad \text{Ecuación 49}$$

### 2.2.11. Modelo COST 231–Walfish–Ikegami

El modelo COST231-Walfish-Ikegami fue desarrollado para sistemas micro celular y distingue entre LoS y NLoS propagación.

El modelo es preciso para frecuencias portadoras en la gama de  $800 \leq f_c \leq 2000$  (MHz) y distancias de trayecto en el rango  $0.02 \leq d \leq 5$  (km).

Para condiciones de escenarios con línea de vista (LoS) la pérdida de propagación de LoS en un cañón callejero es:

$$L_{o(dB)} = 42.6 + 26 \log_{10}\{d\}Km + 20 \log_{10}\{f_c\}Mhz; \quad \text{para } d \geq 20m \quad \text{Ecuación 50}$$

Los parámetros del modelo son la distancia  $d$  (km) y la frecuencia portadora  $f_c$  (MHz).

Para la propagación sin línea de vista (NLoS), se toma como referencia para el análisis la figura 17, las pérdidas de trayecto expresan en términos de los siguientes parámetros:

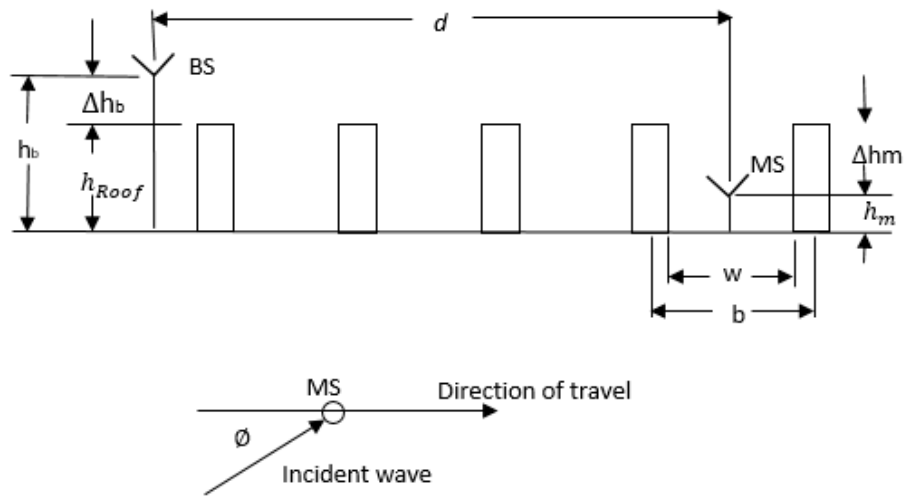


Figura 17. Definición de los parámetros utilizados en COST-231\_Walfish-Ikegami.  
Fuente: ajustado de (Stüber, 2017).

Los parámetros del modelo son:

MS = Es la estación móvil

BS = Es la estación base

$d$  = Distancia en metros.

$h_b$  = BS altura de la antena sobre el nivel de la calle;  $4 \leq h_b \leq 50$  (m)

$h_m$  = MS altura de la antena sobre el nivel de la calle;  $1 \leq h_m \leq 3$  (m)

$h_{Roof}$  = Altura nominal del techo de los edificios (m)

$\Delta h_b = h_b - h_{Roof}$  = altura de BS con respecto a los tejados (m)

$\Delta h_m = h_{Roof} - h_m$  = altura de MS con respecto a los tejados (m)

$w$  = ancho de las calles (m)

$b$  = separación de edificios (m)

$\phi$  = ángulo de la onda incidente que se forma con la calle en grados.

Cuando no se dispone de datos reales de la infraestructura de los edificios y las carreteras, se recomiendan los siguientes valores por defecto,  $b = 20$  hasta  $50$  (m),  $w = b/2$  (m),  $\phi = 90^\circ$ , y  $h_{\text{Roof}} = 3 \cdot \text{número de pisos} + \text{techo}$  (m), donde el techo =  $3$  (m) cuando es inclinado y  $0$  (m) si es plano.

La pérdida de trayectoria NLoS se compone de tres términos, a saber.

$$L_p(\text{dB}) = \begin{cases} L_o + L_{rts} + L_{msd}, & \text{para } L_{rts} + L_{msd} \geq 0 \\ L_o, & \text{para } L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 51}$$

De donde se define que:

$$L_o = \text{Pérdida de espacio libre} = 32.4 + 20 \log_{10}\{d\} + 20 \log_{10}\{f_c\}$$

$L_{rts}$  = Difracción y pérdida de dispersión de techo a calle

$L_{msd}$  = Pérdida de difracción multipantalla  $L_{msd}$

La difracción y la pérdida de dispersión de techo a calle representan el acoplamiento de la propagación de la onda a lo largo de la trayectoria de la multipantalla en la calle donde se encuentra la MS, y viene dada por:

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log_{10}\{w\} + 10 \log_{10}\{f_c\} + 20 \log_{10}\{\Delta h_m\} + L_{ori} \quad \text{Ecuación 52}$$

Para:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354(\phi) & , \quad 0 \leq \phi \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35^\circ) & , \quad 35^\circ \leq \phi \leq 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\phi - 55^\circ) & , \quad 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases} \quad \text{Ecuación 53}$$

$L_{ori}$ : es una pérdida de orientación en la calle.

La pérdida por difracción en múltiples pantallas es:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}\{d\} + k_f \log_{10}\{df_c\} - 9 \log_{10}\{b\} \quad \text{Ecuación 54}$$

Para:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}\{1 + \Delta h_b\}, & h_b > h_{Roof} \\ 0, & h_b \leq h_{Roof} \end{cases} \quad \text{Ecuación 55}$$

Es la ganancia de sombra (pérdida negativa) para los casos en que la antena de la BS está por encima de los tejados. Los parámetros  $k_a$  y  $k_d$  dependen de la longitud del trayecto  $d$  y de la elevación de la estación de base con respecto a los tejados  $\Delta h_b$ .

El término  $k_a$  explica el aumento de las pérdidas del trayecto cuando las antenas de la BS están situadas por debajo de los tejados de los edificios adyacentes y viene dado por (Kumar, P., Patil, B., & Ram, 2015):

$$k_a = \begin{cases} 54, & h_b > h_{Roof} \\ 5 - 0.8\Delta h_b, & d \geq 0.5 \text{ km and } h_b \leq h_{Roof} \\ 5 - \frac{0.8\Delta h_b d}{0.5}, & d < 0.5 \text{ km and } h_b \leq h_{Roof} \end{cases} \quad \text{Ecuación 56}$$

Los términos  $kd$  y  $kf$  representan la dependencia de la pérdida de difracción de la multi pantalla de la distancia y la frecuencia, respectivamente, y vienen dados por considerar que (\*) es utilizada para densidad moderada de arboles

$$k_d = \left\{ \begin{array}{l} 18, \quad h_b > h_{Roof} \\ 18 - \frac{15\Delta h_b}{h_{Roof}}, \quad h_b \leq h_{Roof} \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 57}$$

$$k_f = -4 + \left\{ \begin{array}{l} 0.7 \left( \frac{f_c}{925 - 1} \right), \text{Ciudad media y suburbana (*)} \\ 1.5 \left( \frac{f_c}{925 - 1} \right) \quad \text{area metropolitana} \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 58}$$

El modelo COST-231-Walfish-Ikegami funciona mejor para el  $hb \gg hRoof$ . Se pueden esperar grandes errores de predicción para  $hb \approx hRoof$ .

El modelo es pobre para  $hb \ll hRoof$  porque los términos en la ecuación 58 no consideran la guía de ondas en los cañones de las calles y la difracción en las esquinas de las calles (Stüber, 2017).

### 2.2.12. Modelos ITU-R

Por la complejidad de los fenómenos, ambientes y características de los equipos de radio transmisión, a menudo es difícil seleccionar el mejor modelo para una aplicación, sin embargo, las recomendaciones elaboradas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones son una buena fuente de referencia en esta situación, porque resumen de forma sencilla

algunos procedimientos recomendados. Puede que no siempre representen el modelo más exacto para un caso determinado, pero tienen la ventaja de ser ampliamente aceptadas y utilizadas para fines de coordinación y comparación.

Dos recomendaciones en particular relevantes en el estudio del espectro y la propagación son: ITU-R Recomendación P.1411-10 y ITU-R Recomendación P.1546-5, que se pueden obtener en <http://www.itu.int/ITU-R/> a continuación se resumen dichas recomendaciones (Stüber, 2017).

- *ITU-R Recomendación P.1411-10*

Esta Recomendación es útil en aplicaciones de macro células que es aplicable a los sistemas sin línea de visibilidad directa que funcionan entre 20 m y 5 km, es esencialmente una versión del modelo COST 231Walfisch-Ikegami con procedimientos de cálculo simplificados y generalizados (Saunders & Aragon, 2018).

Sugiere que para trayectos de distancias inferiores a un kilómetro se presenta un efecto considerable debido a las construcciones y arbustos, mas no por las elevaciones de la variación del terreno. La influencia de las edificaciones es dominante porque la mayoría de los enlaces de comunicaciones inalámbricas se establecen en ambientes urbanos y suburbanos, y por tanto, los usuarios transportan el terminal en sus manos o en vehículos.

La norma técnica establece una categorización de la propagación en trayectos cortos acompañado de métodos analíticos para estimar pérdidas en las trayectorias, los retardos por dispersión, efectos de correlación cruzada y la dispersión angular a lo largo de dichos trayectos.

Con esta reglamentación, es factible establecer las directrices sobre la propagación de corto alcance en ambientes exteriores cuando se trabaja en el rango de frecuencias que van desde los 300 MHz hasta los 100Mhz.

También, facilita la información sobre los modelos de pérdidas de trayecto cuando se trabaja en condiciones de línea de vista (LOS) y en condiciones sin línea de vista (NLOS), perdidas en las entradas de los edificios, modelos de multitrayecto para la propagación entre las calles, análisis de los efectos sobre tejados, el número de componentes de la señal, las formas y características de polarización y desvanecimiento, la norma puede ser utilizada en los estudio de compatibilidad electromagnética del espacio (International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation, 2019).

- *ITU-R Recomendación P.1546-5*

El modelo es útil para alcances mayores de hasta 1000 km se basa en series de curvas (o tablas), originadas a partir de mediciones, que permiten hacer predicciones para macro células de área amplia y para aplicaciones de radiodifusión y de acceso inalámbrico fijo (International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation P.1546-5, 2013).

Además de las curvas de predicción básicas, existe un conjunto de métodos de corrección que tienen en cuenta factores tales como: las variaciones del terreno, la distancia real entre la estación base y el terminal móvil, los trayectos que atraviesan mezclas de tierra y mar y las predicciones para diferentes porcentajes de disponibilidad temporal. Con esta recomendación técnica se obtienen resultados similares al prototipo obtenido por Okumura-Hata para alcances de hasta 10 km (Kim et al., 1999).



La particularidad de la normativa es la validez que se obtiene cuando se trabaja en frecuencias entre 30MHz a 3 GHz y distancias establecidas desde 1km hasta 1000 km. Como tal es aplicable a una amplia gama de tipos de sistemas de comunicaciones inalámbricas, incluyendo macro células de área amplia, sistemas móviles de radio privadas (PMR), sistemas de radio navegación aérea, sistemas de radio y redes de radiodifusión terrestre de vídeo y audio (Saunders & Aragon, 2018).

La descripción matemática del método se basa en la interpolación y/o extrapolación de las curvas de intensidad de campo eléctrico obtenidas de forma empírica al considerar es su análisis, parámetros como: la distancia, la altura de la antena, la frecuencia de trabajo y el porcentaje de tiempo de disponibilidad.

Para mayor precisión se incluye además parámetros de corrección de los resultados que se obtienen de la interpolación y/o extrapolación con el propósito de reflejar el grado de despejamiento del terreno y los posibles obstáculos que impiden que la terminal móvil pueda recibir el nivel de potencia adecuado.

Las curvas que se obtienen de las normas se refieren a trayectos terrestres y a trayectos marítimos, con los valores de la intensidad de campo para una potencia radiada aparente (PRA) de 1 kW en la gama de frecuencias base de: 100 MHz, 600 MHz y 2000 MHz.

### **2.2.13. Modelo Erceg C o SUI**

La metodología utilizada en este modelo se basa en una gran base de datos experimentales recopilados por AT&T Wireless Services en los Estados Unidos para más de 90 macro celdas que trabajan en la frecuencia de 1.9GHz, la principal fuente de información se

obtuvo de New Jersey, Seattle, Chicago, Atlanta y Dallas, es aplicable a sistemas NLOS para equipos terminales ubicados en las azoteas, ventanales y techos; al final se establecieron 3 tipos de escenarios del estudio geográfico (Perez, 2015), así:

Tipo de terreno A, establece un terreno con mediana y alta densidad de árboles, con una alta pérdida de trayectoria.

Tipo de terreno B, aplicable a terrenos montañosos con baja densidad de árboles y terrenos llanos moderada y alta densidad de árboles.

Tipo de terreno C, utilizada en terrenos llanos con baja densidad de árboles y representa una baja pérdida de trayectoria.

El modelo Erceg, en resumen considera el efecto del aumento de las pérdidas básicas de propagación por trayectoria en este tipo macro celdas y estima el incremento de la distancia entre la estación base y el terminal móvil, los datos de las pérdidas se expresan mediante la ecuación 59 (Erceg et al., 1999):

$$L_b(dB) = A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + x \quad \text{Ecuación 59}$$

Dónde:

$L_b$  es la pérdidas básicas del trayecto (*path loss*),  $A$  es la pérdidas en espacio libre y  $x$  es una variable aleatoria que representa la desviación estándar debido al desvanecimiento por sombra (*shadow fade*).

La atenuación por espacio libre (*free-space path loss*) está dado como:

$$A = 20 \log_{10} \left[ \frac{4\pi d_0 f}{c} \right] \quad \text{Ecuación 60}$$

Donde  $f$  es la frecuencia de operación en Hz y  $c$  es la velocidad de propagación de la luz en el vacío de 300.000.000 m/s.  $d$  es la distancia en metros entre la estación base BS y la estación móvil (MS) y  $d_0$  es la distancia de referencia (100m).

$\gamma$  Es el exponente de pérdidas y está dado por la siguiente ecuación:

$$\gamma = A - B * h_{BS} + B * h_{BS}^{-1} \quad \text{Ecuación 61}$$

Siendo  $h_{BS}$  la altura de la estación base (BS) y A,B y C son las constantes dependiendo del terreno adoptado como se observa en la **tabla 6** (Hari, K. V. S., Baum, D. S., Rustako, A. J., Roman, R. S., & Trinkwon, 2001):

Tabla 6: Constantes características del tipo de terreno.

Parámetro	Terreno A	Terreno B	Terreno C
a (veces)	4,6	4,0	3,6
b (m)	0,0075	0,0065	0,005
c (m)	12,6	17,1	20

Fuente: ajustado de (Stüber, 2017).

Consideraciones del modelo:

Para simplificar el modelo, se sugiere que A sea modelado por la fórmula  $20 \log_{10}(4\pi d_0/\lambda)$  para todos los casos, donde  $\lambda$  es la longitud de onda en metros, ya que la

mayoría de sus valores estaba cerca de la pérdida por trayectoria que es aproximadamente 78 dB en el espacio libre a 100 m y con esta consideración  $\gamma$  y  $\sigma$  cambian de manera mínima.

El exponente de pérdidas de potencia  $\gamma$  dependerá también de manera considerable de la altura del equipo de transmisor base y del tipo de terreno, a diferencia de  $\sigma$  que no presenta una gran influencia con respecto de la altura de la antena. Ambas variables son aleatorias entre una macro celda a otra.

El método de la Universidad de Stanford (Modelo SUI) es un trabajo conjunto con el grupo de trabajo del protocolo IEEE 802.16 que buscaron describir el comportamiento del canal para la tecnología Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) para entornos suburbanos, utilizó datos específicos para diseñar un modelo que trabaje a la frecuencia de 3.5 GHz, el radio de las celdas entre 0,1 Km hasta 8Km, alturas de estaciones bases entre 10m a 80m y la ubicación del receptor móvil entre 2m hasta 10m. El trabajo al final se resumió en la ecuación 62.

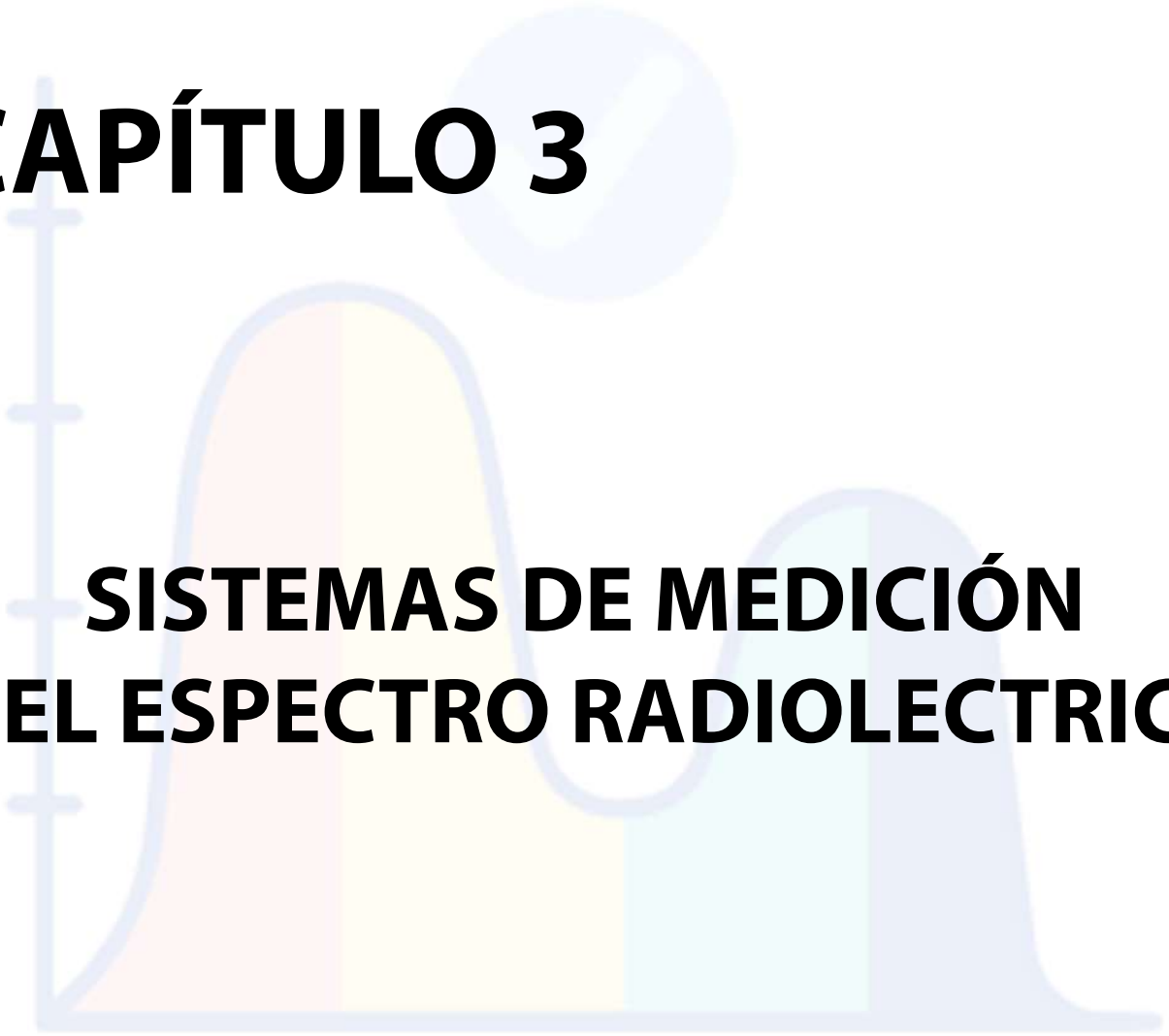
$$L_b(dB) = A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + s \quad \text{Ecuación 62}$$

Los nuevos parámetros obtenidos son:

$X_f$ , que permite una corrección de frecuencia sobre los 3Ghz,  $X_h$  es la corrección de la altura de la antena transmisora y  $s$  es una variable aleatoria que representa la desviación estándar debido al desvanecimiento por sombra.

# **CAPÍTULO 3**

## **SISTEMAS DE MEDICIÓN DEL ESPECTRO RADIOELECTRICO**



## CAPÍTULO 3

### SISTEMAS DE MEDICIÓN DEL ESPECTRO RADIOELECTRICO

En las disposiciones internacionales de la gestión del espectro radioeléctrico se establece que se deben utilizar procedimientos de la medición del espectro radioeléctrico de tipo: administrativos, científicos y de ingeniería, necesarios para garantizar una explotación y funcionalidad de los equipos, como también de los diferentes servicios de radiocomunicación, de manera que no se produzcan ningún tipo de interferencias para garantizar la coexistencia de diferentes tecnologías.

El objetivo principal es el de lograr flexibilizar y maximizar el uso eficiente del espectro, reducir la interferencia y evitar las bandas de frecuencias no autorizadas por la reglamentación Nacional como es el caso del trabajo que se realiza de la gestión y administración del espectro por parte de la Agencia nacional del Espectro (ANE) en Colombia.

Con base en lo anterior, la jurisprudencia en normas y reglamentaciones en la legislación tanto nacional como internacional constituyen una base reglamentaria y legal para el proceso de la gestión del espectro. Para tal fin, existe un grupo de tareas que se dedican a la planificación, medición, gestión y administración del espectro, que generan la información de forma permanente por medio de bases de datos donde se detallan: los usuarios, dispositivos, información técnica, servicios entre otros.

El proceso de gestión del espectro cuyos resultados son las decisiones de atribución de espectro, asignaciones de frecuencia y concesión de licencias en el espectro están basadas en el análisis de la información de estas bases de datos.

Por tanto, la inspección, la comprobación técnica del espectro y generación de nuevas normas legales aportan los medios necesarios para mantener la integridad del proceso de gestión del espectro (Manual, 2011)

En consideración de lo anterior, en el estudio de la Ingeniería de medición del espectro se aplican los procedimientos científicos para analizar, identificar, gestionar y recomendar soluciones a los problemas de interferencia, determinar posibles características técnicas de los equipos necesarios para asegurar la compatibilidad entre los sistemas, además de, facilitar los pliegos y requerimientos técnicos, como también tener presente las políticas públicas en lo que respecta a la asignación del espectro o sugerir la utilización de tecnologías alternativas.

Hay que estimar que “en un sistema de gestión del espectro en general ” se consideran las siguientes etapas que hacen parte de la consolidación de un proyecto de radio comunicaciones o de radio propagación: Comprobación del espectro, fundamentación legal y normativa, planificación y atribución de frecuencias, ingeniería del espectro, reglas, reglamentos, coordinación y notificación de asignación de frecuencias, concesión de licencias, inspección de estaciones radioeléctricas y cumplimiento con la norma y regulaciones estatales.

Una característica importante en el estudio o medición del espectro es la utilización de modelos empíricos, estadísticos o semi empíricos con los datos extraídos de bases de datos; que permiten generar expresiones y resultados analíticos para representar de forma sistémica algunas variables de un ambiente o sección del espectro que se está midiendo, de manera que,

permitan predecir si es admisible cumplir con las normas y estándares de medición y poder evaluar las probabilidades de interferencias, ruido, potencia, intensidad de campo y demás (Manual, 2011).

Mediante el desarrollo de nuevos equipos de cómputo por su capacidad software y hardware, es factible reducir el equipamiento para realizar la medición del espectro, como es el caso de los equipo portátiles, con los cuales es posible por medio de la unidades de radio frecuencia para tecnología Bluetooth, wifi o mediante la utilización de un dispositivo pequeño o un adaptador (Dongle, en inglés) conectarlo al computador para aportar una función adicional para realizar la medición del espectro o también se utilizan dispositivos de tecnología de [Radios Definidos por Software](#) (SDR) que se convierten en un receptor de radio frecuencia para experimentar en el amplio mundo del espectro radioeléctrico y mejoran la captura de variables que se analizan dentro del espectro.

Las comprobaciones técnica se pueden realizar de acuerdo al tipo de estaciones: *estaciones fijas, estaciones móviles y estaciones portátiles*, las estaciones de comprobación técnica normalmente son portátiles el cual permiten que las actividades de comprobación técnica gocen de mayor flexibilidad con analizadores de espectro y antenas menor tamaño, receptores portátiles y antenas direccionales para facilitar la labor técnica; los instrumentos son necesarios para determinar la localización exacta de la interferencia o verificar sobre el terreno la conformidad del equipo de radio con los parámetros técnicos relevantes (Manual, 2011).

De acuerdo al Reglamento de Radiocomunicaciones de medición del espectro en el mercado existen aparatos portátiles que realizan medidas de campo en la gama de frecuencias de 150 kHz a 30 MHz, pero la precisión puede variar en al menos 2dB, sin embargo, la



sensibilidad es inadecuada para la medición de campos de muy baja intensidad, de forma que, la norma propone usar equipos de banda estrecha con mayor sensibilidad (Manual, 2011).

También existen dispositivos móviles que van desde los 20 MHz hasta los 3 GHz de bajo peso con una pequeña pantalla y con antenas de banda ancha adecuadas para aplicaciones portátiles. No obstante, si son necesarias mediciones más sensibles y precisas es conveniente utilizar equipos más robustos que incluyen: un receptor de comprobación técnica móviles equipado con antenas, sistemas de goniometría, software, analizador de redes vectoriales, medidor de campo, analizador de espectro, compas electrónico y GPS, entre otros.

Las *estaciones portátiles* de comprobación técnica que son transportables y con antenas portátiles permiten realizar las siguientes tareas:

Realizar mediciones de comprobación técnica desde la parte superior de edificios. Frecuentemente las estaciones de comprobación técnica móviles se ven perjudicadas por el efecto de los trayectos múltiples, en tal caso las estaciones de comprobación técnica portátiles pueden reducir dicho efecto;

Realizar pruebas de medición en zonas rurales, donde las estaciones de comprobación técnica pueden ubicarse en puntos más elevados inaccesibles para los vehículos móviles;

Medir en puntos específicos como son: avenidas, edificios entre otros.

### **3.1. Observaciones sobre las mediciones**

En el ambiente de comprobación técnica del espectro en el proceso de medida se asigna un valor o atributo, que por ejemplo puede ser la medición del *nivel de potencia* de la

señal; el cual debe ir acompañada de la definición del: atributo a medir, las condiciones de operación de los equipos, el sistema de medición y parámetros a utilizar, secuencia de operaciones técnicas a aplicar y resultados de la estimación de los datos; teniendo presente las incertidumbres implícitas en la confinación del ambiente donde se realizan las medidas, que están sujetas a las influencias de las infraestructuras físicas, el clima, la calibración de los equipos y los errores que se presenta en la toma de las medidas.

Un sistema de medición del espectro básico lo conforman: el software, el sensor físico que puede ser una antena embebida dentro del equipo o de conexión externa, un acondicionador de señal que en el caso de un dispositivo portátil lo conforma la tarjeta de red que incluye un sistema de radio con sus filtros, amplificadores, acopladores y demás elementos de acondicionamiento, y finalmente el equipo de medida o microprocesador, que es el dispositivo que procesa la señal, la registra y la visualiza, como se detalla en la figura 18.



Figura 18. Elementos básicos de un sistema de medición: Portátil, tarjeta red inalámbrica, antena y Dongle Wifi.

Si se realizan las mediciones con equipos de laboratorio de forma portátil o móvil se utilizan los componentes de la figura 19:



**Figura 19. Equipo de medición de laboratorio: Analizador de espectro y antena.**

Una base metodológica del Manual de Comprobación del espectro de UIT, especifica la secuencia de operaciones técnicas, que describe de forma abreviada como se realizan las mediciones:

- 1). Describir la configuración de la cadena de medida, identificando los equipos utilizados;
- 2). Ejecutar las mediciones preliminares a realizar (por ejemplo, mediciones para garantizar que no existe un emisor potente en el emplazamiento donde se realiza la medición que pueda provocar un resultado erróneo) ;
- 3). Ajustar el dispositivo de medición utilizado (por ejemplo: banda de frecuencia, anchura de banda de resolución (RBW), margen)
- 4). Realizar las tareas necesarias para la medición: captura, filtrado, entre otras.
- 5). Verificar la consistencia del resultado (por ejemplo: determinación teórica del cálculo de la incertidumbre, precisión de la amplitud y la frecuencia, sensibilidad de la señal, auto calibración).

### **3.2. Estimaciones generales sobre la medición de la densidad de flujo de potencia y la intensidad de campo eléctrico.**

Como lo expresa la norma técnica, tomando como referencia las medidas del nivel potencia de Radio Frecuencia (RF) es posible calcular los parámetros de intensidad de campo eléctrico o la densidad de flujo de potencia en una transmisión de microondas, con el fin de realizar la comprobación técnica del espectro para saber cómo están funcionando los enlaces de radio y conocer el estado del servicio.

Para realizar dichas mediciones se establecen cuatro clases de medidas (Manual, 2011):

Mediciones con dispositivos móviles o portátiles para capturar los datos en tiempos del orden de los milisegundos en diferentes puntos de medida.

Medidas realizadas con dispositivos móviles para obtener los estadísticos básicos de cobertura como es el caso de: la media, la varianza, la desviación estándar.

Medidas de corta duración en sitios fijos estratégicos para respaldar y complementar los datos obtenidos.

Mediciones de larga duración para capturar los registros de intensidad de campo con el fin de obtener los gráficos correspondientes, almacenamiento y análisis de los datos obtenidos.

Los objetivos de la ingeniería de estudios de campo sobre las mediciones consideran que se debe (Manual, 2011):

Asegurar que la intensidad de señal generada por el transmisor garantiza el servicio y área de cobertura.

Respaldar que la compatibilidad electromagnética en las transmisiones así se presenten efectos de interferencias

Diagnosticar que nivel de intensidad de señal y que efectos interferentes pueden provocar emisiones no intencionadas de cualquier otro equipo de radioeléctrico que radie energía electromagnética y evaluar la eficacia de las medidas de supresión;

Evaluar las eficiencias de los equipos de medición y los datos obtenidos.

Cuantificar los fenómenos de propagación para comprobar los modelos de propagación estándares probados y posibles nuevos modelos.

Recopilar la data sobre ruido radioeléctrico, fenómenos atmosféricos y condiciones climáticas del ambiente a caracterizar.

Cumplir con las políticas de Estado de cada país de acuerdo a referentes internacionales y datos de los fabricantes de equipos.

Evaluar la eficacia de las mediciones y las posibles exposiciones electromagnéticas al cuerpo humano.

Para iniciar las medidas en sitio sobre los valores de la intensidad de campo se debe confinar el lugar y particularizar el área de trabajo con lineamientos específicos en donde incluya los factores, elementos y objetos del emplazamiento en condiciones reales, justamente porque las ondas radioeléctricas presentan un comportamiento estocástico con dependencias espacial y temporal aleatorias superpuestas de las señales a medir, de ahí que la aproximación con métodos de predicción y modelos informáticos permiten inferir sobre los resultados de los valores de intensidad de campo con una gran ventana de acierto.

De acuerdo a investigación realizada por (Álvarez, F., Zuluaga, S., & Peláez, 2018) para planear y predecir la cobertura de la red requiere conocer las limitaciones, condiciones ambientales y características de radio de determinado entorno y se debe determinar la propagación de las señales tales como la interferencia y la atenuación por múltiples trayectorias.

Los elementos o variables a considerar para la medición de la intensidad de campo y la densidad de flujo de potencia (dfp) son los siguientes:

Lectura intensidad del receptor.

Valor de la atenuación de la conexión entre antena y receptor.

Calcular el factor de antena.

Cuantificar la tensión sinusoidal del receptor.

Examinar la selectividad del receptor en relación con la anchura de banda ocupada.

Medir o calcular el ruido de fondo del receptor.

Observar el efecto de desadaptación entre antena y receptor.

Interpolación si es el caso la frecuencia en el factor de antena.

Variar el factor de antena con la altura sobre el suelo circundante y otros efectos de acoplamiento mutuos.

Determinar la directividad de la antena.

Observar las respuestas de la antena a la polarización cruzada o la que considere necesaria.

Tener en cuenta la simetría de la antena.

Sopesar las sombras y reflexiones debidas a obstáculos.

La ITU recomienda como medida de precaución, las mediciones de intensidad de campo o de densidad de flujo de potencia deben complementarse en algunos casos con otras mediciones de la calidad de la señal, tales como la conversión de Modulación en Frecuencia (FM), la proporción de bits erróneos (BER) y la respuesta impulsiva del canal en los sistemas de comunicaciones móviles digitales debido a la transmisión multi trayecto.

Pero cuando solo se mide el nivel de potencia de la señal portadora en dBm recibida, puede obtenerse la  $d_{fp}$  en dB(W/m<sup>2</sup>) mediante la ecuación 63, (Manual, 2011).

$$s \left( dB \left( \frac{W}{m^2} \right) \right) = p(dBm) - ae(dB(m^2)) - 30dB \quad \text{Ecuación 63}$$

En detalle la superficie efectiva ( $ae$ ) equivalente a:

$$ae(dB(m^2)) = 38.55 + g - 20 \log \frac{f}{MHz} \quad \text{Ecuación 64}$$

Donde  $g$  es la ganancia isotrópica.

Como normalmente  $ae$  no incluye la atenuación del cable de transmisión entre la antena y el receptor de medida ( $ac$ ), la expresión puede ser representada como:

$$s \left( dB \left( \frac{W}{m^2} \right) \right) = p(dBm) - ae(dB(m^2)) - 30dB + ac(dB) \quad \text{Ecuación 65}$$

Los equipos de comprobación técnica ubicados en vehículos presentan mayor ventaja que los equipos de medición fija, porque se utilizan tanto en aplicaciones estacionarias cuando el vehículo no se desplaza como en aplicaciones móviles, facilitando la medición de las distribuciones espaciales y temporales de la intensidad de campo.

### 3.3. Métodos de medida

Para medir la intensidad de campo en las estaciones de comprobación técnica se puede realizar por diferentes métodos que depende del tipo de información a clasificar y filtrar los más comunes es:

a) El registro continuo durante largos periodos: Es la recopilación de grandes volúmenes de datos durante varios años con la influencia de las variaciones estacionales y de las variaciones cíclicas del número de manchas solares sobre la propagación, en ciertos trayectos en la banda de radiodifusión en ondas hectométricas.

b) El registro continuo durante periodos más breves, a fin de estudiar variaciones diurnas y nocturnas y otras variaciones a corto plazo del nivel de una señal.

c) El muestreo a intervalos próximos para trayectos cortos en tiempos cortos (por ejemplo, durante 5 s cada 2 min).

d) El muestreo con tiempos de más espaciado (por ejemplo, durante 10 min cada 90 min), (Manual, 2011).

En el caso de las ondas de superficie solo es necesario un breve periodo de medida dependiendo de la finalidad de las mediciones, para la propagación en ondas decamétricas es necesario disponer de datos sobre las condiciones generales de propagación en toda una banda de frecuencias. Pero en la práctica se realiza la captura de breves registros en toda la banda en cuestión de unos 10 min, a intervalos de 90 min de estaciones que transmiten permanentemente las 24 horas del día, elegidas de modo que el conjunto de las frecuencias y de las distancias de interés estén debidamente representadas. Para las ondas que se propagan en la ionósfera se realizan mediciones en días diferentes para tener en cuenta las variaciones diarias de la ionosfera.

La Recomendación (International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation SM.378-7, 2018) establece que:



“Salvo cuando existan limitaciones debidas al nivel de ruido del receptor, ruido atmosférico o interferencias externas, la precisión que cabe esperar en las mediciones de intensidad de campo es mejor que  $\pm 2$  dB para frecuencias inferiores entre 9Khz a 30 MHz y  $\pm 3$  dB para frecuencias superiores a 30 MHz a 3 GHz, a veces se pueden aceptar precisiones más bajas para frecuencias inferiores a 30 MHz; además cuando a causa de las limitaciones del equipo de medida utilizado, de las interferencias, de la inestabilidad de la señal o por otras razones no sea aceptable obtener la precisión indicada anteriormente, se tomen no obstante en consideración las mediciones efectuadas, teniendo en cuenta la precisión obtenida”.

La ganancia, frecuencia, anchura de banda y atenuación del dispositivo receptor (analizador de espectro, analizador espectral o medidor de campo) son claves en la estabilidad, para ello se realizan los ajustes a intervalo cero y máxima retención en cada frecuencia y dejando que la traza se forme a lo largo de una serie de exploraciones, además si existe un control de las mediciones con un ordenador de deben automatizar las mediciones, almacenarlas y filtrarlas para su posterior análisis de los datos (RecommendationSM.378-7, 2018).

De igual forma, se realizan las calibraciones del transmisor y el receptor por separado junto con las antenas y los cables utilizados para la medición, como lo determina la reglamentación y la normativa técnica, sobre todo para frecuencias inferiores a 30 MHz (RecommendationSM.378-7, 2018).

Para evitar errores en las medidas es necesario recalibrar periódicamente los equipos y revisar las antenas portátiles para asegurarse de no han sufrido algún daño mecánico y, de ser así, repararse y recalibrar nuevamente.

### 3.4. Programas de software

Para el caso de estudio al aplicar una metodología con técnicas experimentales en campo se mencionan algunos programas de software con licenciamiento libre que pueden ser utilizados para facilitar el sensado y medición de los niveles de intensidad de potencia; y que pueden ser instalados en portátiles o en dispositivos móviles para facilitar la captura y procesado de los datos cumpliendo con los estándares y recomendaciones de medición de acuerdo a los organismo nacionales e internacionales que realizan la gestión y administración del espectro.

En el caso de aplicaciones de computador podemos mencionar los siguientes:

Desde 2007 inSSIDer ha sido la herramienta líder para visualizar WiFi muestra los detalles esenciales sobre sus puntos de acceso, incluido el canal, el ancho del canal, la intensidad de la señal, la generación de WiFi, la velocidad máxima de datos y la seguridad. También le muestra cómo las redes WiFi vecinas están afectando su WiFi, se puede obtener de: <https://www.metageek.com/support/downloads/download-inssider-win.html>.

Vistumber es un escáner de redes inalámbricas por medio del uso del GPS del móvil, rastrea la red Wifi y realiza el trazado en un mapa de las ubicaciones exactas con información de: encriptación, fuerza de la señal, nombre de la red, tipo de canal y otros datos relevantes.

Extraído de: <https://www.netspotapp.com/es/best-wifi-analyzer-windows-apps.html#Vistumber>.

Acrylic WiFi Profesional es el analizador WiFi más completo para realizar análisis de cobertura y seguridad WiFi, permite mapear los puntos de acceso (AP) cerca de su radio de cobertura de acuerdo al nivel de potencia de radio del equipo sobre el cual está instalado,

puede identificar y resolver incidencias en redes WiFi 802.11a/b/g/n/ac/ax en tiempo real, como también ver las velocidades de transmisión y optimizar los canales de las redes WiFi. Extraído de: <https://www.acrylicwifi.com/programas-software-herramientas-wifi/analizador-wifi-acrylic-wifi-profesional/>.

Xirrus Wi-Fi Inspector es una solución de software que puede ayudarlo a monitorear las redes inalámbricas de su computadora portátil o adaptador de red. Esta aplicación le permite buscar redes WiFi, mostrar problemas de conectividad, detectar puntos de acceso no autorizados y verificar la configuración de AP y la cobertura, tiene una interfaz limpia y fácil de usar que muestra información detallada sobre la conexión WiFi actual, como SSID, BSSID, canal, nivel de señal y modo de red. Extraído de: <https://www.softpedia.com/get/Network-Tools/Network-Monitoring/Xirrus-Wi-Fi-Inspector.shtml>.

*En el caso de las aplicaciones móviles se pueden destacar las siguientes:*

G-NetSignal: es una aplicación para mediciones de intensidad de señal de red móvil y WiFi.

Puede usarlo para encontrar los mejores lugares con la señal más fuerte para operadores móviles y redes inalámbricas.

Extraído de:

[https://play.google.com/store/apps/details?id=com.gyokovsolutions.gnetsignal&hl=en\\_US](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.gyokovsolutions.gnetsignal&hl=en_US).

Net Monitor Cell Signal: Es útil para los ingenieros de redes móviles, la aplicación se ejecuta en Android 4.3 o superior, las características destacables son:

- monitorización on-line de la señal de GSM / WCDMA / LTE de la red y los servicios
- 2x1 y 4x2 Reproductores

***Jorge Enrique Herrera Rubio***

- Intensidad de la señal en la barra de estado e información de red en la notificación.
- Mantener millones y más mediciones en una base de datos y verlos sin conexión
- La recogida de datos en segundo plano y potencia de la señal en el mapa
- Sesión de exportación a CSV y KML, datos de los mapas Exportar a KML y estadísticas de medición
- Cargar y utilizar el archivo de datos externo con BTS adicional de la célula
- Copiar y analizar la base de datos SQLite en un PC
- Uso implementado proveedor de contenidos en sus propias aplicaciones para recuperar datos de la base de datos

Se puede obtener de:

[https://play.google.com/store/apps/details?id=ru.v\\_a\\_v.netmonitor](https://play.google.com/store/apps/details?id=ru.v_a_v.netmonitor).

G-MoN: Es un escáner para redes GSM / CDMA / EVDO / UMTS y LTE, también identifica redes Wi-Fi, guarda los datos con las coordenadas GPS en un archivo en la tarjeta SD. Puede crear un archivo KML para Google Earth, muestra la encriptación de los datos, la potencia de la señal y los puntos de acceso en un mapa en tiempo real.

Extraído de: <https://play.google.com/store/apps/details?id=de.carknue.gmon2>.

Network Cell Info: permite la ubicación de la señal de las estaciones base móvil midiendo la potencia de la red y señales vecinas, facilita la detección de tecnologías móviles celulares: LTE, HSPA+, HSPA, WCDMA, EDGE, GSM, CDMA, EVDO.

Las características más destacadas son:

Mide la intensidad de señal de LTE, UMTS y señal GSM de ubicación por Mozilla Location Service (MLS) con gran exactitud de ubicación - <http://location.services.mozilla.com>

Mide intensidad de la señal (dBm) vs. Gráficos de tiempo del servicio (registrados) y señal vecinas

*Jorge Enrique Herrera Rubio*

Mediciones de registro de la señal en los archivos (bajo la pestaña mapa)

Límite de distancia (0m, 5m, 10m,...) entre mediciones consecutivas en la pestaña MAPA (si la red No cambia)

Opción de límite de la precisión de ubicación del log de medición.

Capacidad para exportar de la base de datos: MLS Geosubmit v.2, CLF v.3, csv OpenCellID, (y la nuestra) CMWF.

Visualiza la ruta de acuerdo a la intensidad de la señal y marcadores de mapa con la ubicación e información de la señal.

Estadísticas de conexión y notificaciones de red 2G/2.5G/3G/3.5G/4G en el área de notificación.

Opciones de vista de mapa: Normal, Satélite, Terreno e Híbrido con vista de mapa concurrente y medidores de metros.

Información

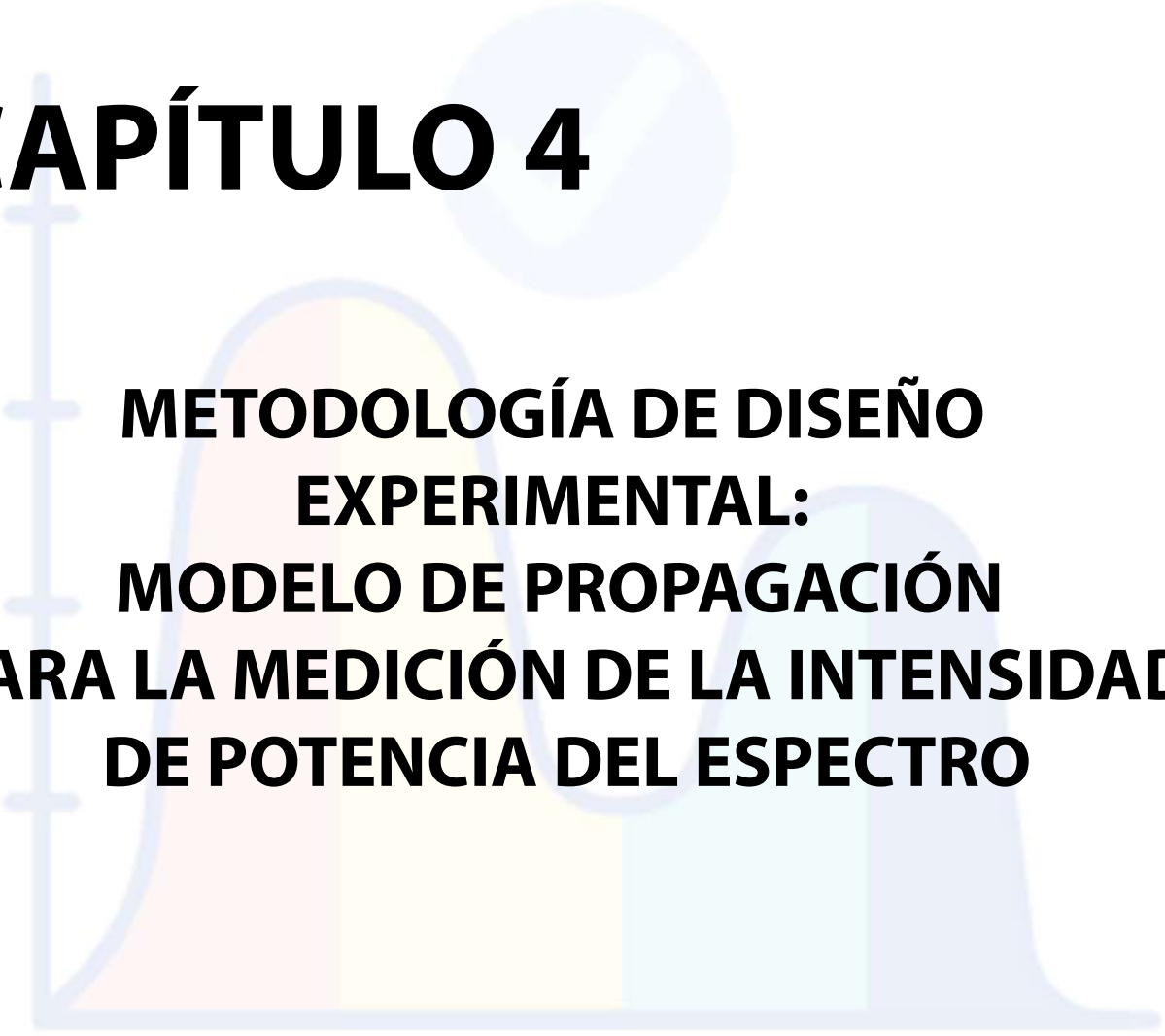
extraída

de:

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.wilysis.cellinfolite>.

# **CAPÍTULO 4**

**METODOLOGÍA DE DISEÑO  
EXPERIMENTAL:  
MODELO DE PROPAGACIÓN  
PARA LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD  
DE POTENCIA DEL ESPECTRO**

The background features a faint, light blue graphic of a spectral intensity plot. It includes a vertical axis with tick marks, a horizontal axis, and a bell-shaped curve. Below the curve, there are several vertical bars of different colors (orange, yellow, green, blue) representing a spectrum. The overall design is clean and professional, with blue and teal geometric shapes in the corners.

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGÍA DE DISEÑO EXPERIMENTAL: MODELO DE PROPAGACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE POTENCIA DEL ESPECTRO

Con el fin de establecer las relaciones causales entre variables estudiadas en campo, se busca verificar el grado de dependencia entre las variables distancia contra potencia para intentar probar una hipótesis mediante una función analítica que trata de encontrar las diferentes relaciones a las preguntas del por qué y el cómo del evento estudiado.

La investigación es de tipo *cuantitativa* (Hernandez Sampieri et al., 2018) y la finalidad que persigue es una investigación tecnológica que se orienta a demostrar la validez con técnicas y procedimientos sobre los que se aplica el método científico para demostrar la transformación de los hechos, de forma que por el nivel de estudio es una *investigación explicativa* (Hurtado, 2012) soportada en un nivel de la investigación *compresivo* cuyo objetivo es *proponer, evidenciar, demostrar y probar* las condiciones del objeto de estudio intentando descubrir leyes y principios para generar modelos explicativos y teorías, para tal fin se va a configurar el proceso mediante el esquema metodológico de la de la tabla 7.

Tabla 7. Configuración metodológica de la investigación

Fases	Etapas del proceso	Pasos para el diseño de la metodología
I	La Investigación a nivel comprensivo	Estudio de las metodologías existentes de medición. Análisis de los diferentes modelos de propagación.
II	Construcción del modelo metodológico para obtener el modelo analítico.	Desarrollo de la metodología experimental.
III	Aplicación de la metodología en el diseño de un modelo.	Evaluar los resultados y comparar con los diferentes modelos de propagación existentes.

Fuente: Elaboración propia

## I . Primera etapa de la investigación: La Investigación a nivel comprensivo

La metodología aplicada toma como referencia las etapas del proceso de investigación explicativa propuesto por (Hurtado, 2012) y (Castán, 2006) para encontrar los procesos que permiten comprender de qué manera ocurre un evento, mas no se ejerce control sobre las variables específicamente las ambientales.

La explicación se limita a establecer relaciones de tipo correlacional entre las variables, ya sea de causalidad o de contingencias, para encontrar los mecanismos por los cuales ocurren los fenómenos estudiados, dichas explicaciones se basan en la observación previa, con procesos de razonamiento (Hernandez Sampieri et al., 2018).

### **4.1. Estudio de las metodologías existentes de medición.**

Las características de los niveles de medición de potencia se pueden determinar mediante la ejecución de diferentes instrumentos de medición y tipologías de medición, para el caso de estudio se clasificaran en tres categorías la forma como se capturan los datos:

- 4.1.1. Utilizando un analizador de espectro
- 4.1.2. Los instrumentos dedicados solamente para tecnologías UMTS/GSM,
- 4.1.3. Drive Test o recorrido de pruebas de RF

En las estaciones de comprobación técnica transportables y portátiles se utilizan equipos de laboratorio como son el analizador de espectro, medidor de campo o analizador de



redes vectoriales de forma temporal en emplazamientos en los que no se requieren mediciones continuas.

Estas se pueden controlar de modo remoto y manejar en modo de medición automático. Las antenas se montan generalmente sobre un trípode, lo que permite realizar operaciones próximas al “lugar de la acción”.

Este tipo de mediciones temporales suelen utilizarse para localizar interferencias esporádicas o para ejecutar comprobaciones del espectro preventivas, los cuales los caracterizan por la portabilidad y flexibilidad (Rohde & Schwarz, 2018).

#### ***4.1.1 Procedimiento mediante el uso de un analizador de espectro***

Mediante este dispositivo electrónico usando un proceso matemático se transforma una señal en sus componentes espectrales que son visualizados en una pantalla sobre una gama específica del espectro por medio de una antena como elemento receptor de entrada de las ondas de radio frecuencia a medir en un instante de tiempo determinado, la visualización en una pantalla se realiza en una escala logarítmica con el nivel en dBm del contenido espectral de la señal en el eje de la ordenada; mientras que en el eje de abscisas se representa la frecuencia sobre una escala de medida en función de la separación del tiempo y con un número de muestras recibidas.

Se denomina el ancho de banda ocupada a una gama de frecuencias del espectro de potencias que se obtiene del análisis espectral entre un límite inferior y un límite superior del espectro que se visualiza en un instante de tiempo continuo, los valores de potencia correspondientes se obtienen sumando las potencias de las distintas componentes espectrales; para la determinación de la anchura de banda ocupada es suficiente seleccionar muestras del

espectro equidistantes en frecuencia de modo que las muestras representan la envolvente del espectro.

A menudo el analizador de espectro convencional realiza un análisis secuencial pero no en tiempo real, razón por el cual es recomendable realizar varias exploraciones (Manual, 2011) a fin de mantener una precisión y exactitud en la toma de las muestras, mediante un sistema sintetizador controlado digitalmente la exploración del espectro se ejecuta en pasos de frecuencia definidos y se almacena en una memoria digital permite que dichos valores medidos puedan ser guardados para el posterior análisis.

#### **4.1.2. Los instrumentos dedicados solamente para UMTS/GSM**

Tomando como ejemplo el caso de estudio de los dispositivos de medición para señales UMTS/HSPA/GSM, la medición espectral es una medición de potencia simple realizada con un analizador de espectro en el dominio de la frecuencia. Las mediciones se realizan con diferentes filtros, en el caso del denominado resolución de ancho de banda (RBW) de entrada; especialmente para señales de banda ancha, la potencia medida depende del filtro RBW establecido en el instrumento.

Dado que una señal UMTS tiene un ancho de banda de 5 MHz, se debe establecer que el analizador de espectro mide la potencia de la portadora de UMTS distinguiendo entre los canales adyacentes que puedan estar interfiriendo la medida.

La mayoría de los instrumentos modernos permiten la medición de la potencia del canal de RF, es decir, se realizan en el dominio de frecuencia una integración de la potencia dentro de un ancho de banda determinado, la integración se calcula mediante rutinas de software: es una medición dedicada que toma en consideración las características de la señal.

La medición en el canal UMTS (3.84 MHz) se realiza con un detector del Valor Cuadrático Medio (RMS) o detector RMS utilizando un RBW mucho más estrecho que el ancho de banda de la señal (típicamente 30 kHz). Además de esto, la señal se filtra con un filtro rectangular para evitar el muestreo de canales adyacentes. Posteriormente se realiza una integración en todo el ancho de banda del canal (Salvadè, A., Guggiari P., & Lanini, 2004).

#### **4.1.3. Drive Test o recorrido de pruebas**

El Drive Test o recorrido de pruebas, es una evaluación en campo efectuado en las redes celulares, independientemente de su tecnología GSM, CDMA, UMTS, LTE, u otras; se utilizan equipo móviles y vehículos para recoger datos sobre los niveles de potencia y servicios que presta el operador en áreas de alto tráfico o situaciones de fallas técnicas en áreas específicas. Es una actividad fundamental para cualquier profesional en el campo de la RF que comprende dos fases: la implantación de la recogida y el análisis de los datos recogidos.

Generalmente los Indicadores Clave de Desempeño (Key Performance Indicator) o KPI facilitan la gestión de la información al sintetizar sobre la eficacia y productividad de las actividades de un operador de radio comunicaciones como por ejemplo: el trámite de las llamadas, el grado de congestión, entre otras, pero con el uso de herramientas (de hardware y software) de predicción es posible determinar las pérdidas de la señal o caídas del sistema, para ello se ejecuta un análisis más profundo en campo para identificar las áreas de cobertura de cada sector, la interferencia, la evaluación de cambios en la red y otros parámetros (telecomHall ES, 2013) que son los más determinantes a la hora de identificar los tipos de fallas y problemas de cobertura.

Para cumplir con la políticas de cobertura y calidad de servicio los operadores de radiodifusión en la fase de planificación utilizan complejos programas de simulación para

realizar la comprobación del espectro de las estaciones transmisoras, pero por la dinámica del mercado, la demanda de nuevos servicios y los cambios de la geografía y la topografía las características de propagación en una región pueden ser extremadamente complejas y muchas veces no se pueden describir por completo de manera teórica, además que, una vez que la red está en funcionamiento se debe proceder a comprobar la situación real de cobertura a través de numerosas mediciones en campo (Schipper, 2017).

La recepción de las señales de radiodifusión terrestre son de naturaleza dinámica, por lo que las especificaciones de cobertura suelen basarse en este tipo de recepción mediante la representación de cualquier lugar dentro de la zona de medición, donde se encuentran los equipos de transmisión para realizar la comprobación técnica y estado de la red de cobertura (UIT-R Radiocomunicaciones, 2016).

Independientemente de si el método preferido se basa en mediciones estáticas, móviles o una mezcla de ambas, la utilización de un software por medio de un equipo móvil o equipo portátil agiliza el tiempo de captura y medición que controla al dispositivo analizador de hardware o quien haga sus veces; estos equipos efectúan la captura cada segundo o en ocasiones en el orden de los milisegundos de forma precisa para que todas las mediciones necesarias se puedan evaluar y analizar en lo que respecta a las causas de disminución de la intensidad de potencia de los equipos transmisores.

En un Drive Test la prueba que se ejecuta es en tiempo real con un equipo de prueba en movimiento que puede ser un vehículo o a pie con el uso de un hardware y un software específico para realizar la captura de los niveles de potencia o intensidad de señal (telecomHall ES, 2013), los elementos básicos utilizados para dicha actividad requiere de:

Un PC portátil - o hardware similar (1)

Una software instalado (2),

Una Dongle o antena inalámbrica interna (3),

Un teléfono móvil (4),

Un GPS (5),

Un Scanner - opcional (6).

Un esquema de interconexión básico de los dispositivos se observa en la **figura 20**.

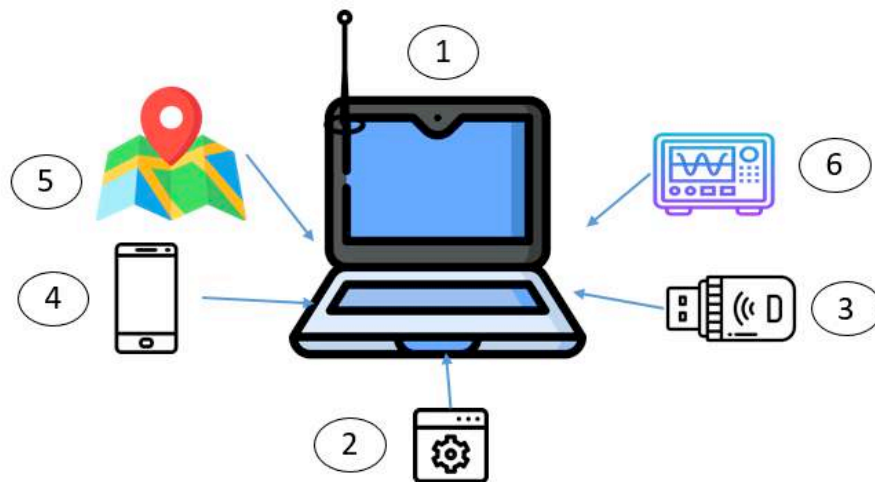


Figura 20. Esquema de conexión para un test drive, tomado de (telecomHall ES, 2013).

Fuente: Elaboración propia, extracción de imágenes de: <https://www.flaticon.es/>

Los drive test facilitan el estudio para el análisis de limpieza de espectro, búsqueda de interferencia, explorar nuevos sitio o emplazamientos de estaciones base y optimización del servicio.

Sin embargo, con base en lo anterior cuando se desea concretar sobre una falla en la radiación de potencia de las estaciones base de radio es aceptable de forma experimental

confinar espacios específicos mediante mediciones realizadas sobre trayectos cortos (entre 10m a 2 km) con equipos de bajo costo, tales como:

*Caso 1:* mediante un computador portátil, un GPS, la tarjeta inalámbrica embebida (o dongle) y una aplicación de software libre que capture los niveles de RSSI.

*Caso 2:* un teléfono móvil, GPS y aplicación APP de software libre, con dichas mediciones es posible generar un modelo matemático de forma experimental para realizar las predicciones de cobertura de los niveles de potencia de recepción en cualquier tipo de ambiente sea: urbano, sub urbano, rural o mixto.

#### **4.2. Análisis de los diferentes modelos de propagación**

En el capítulo 2 se desarrollaron la síntesis de los modelos de propagación en ambientes exteriores más representativos en el estudio, análisis, planeación e implementación de redes inalámbricas móviles como material fundamental para el estudio del estado del arte.

### **II. Segunda etapa de la investigación: Construcción del modelo metodológico**

La investigación experimental explicativa propuesta, requiere como objetivos específicos: la descripción, la comparación y la evaluación para identificar los procesos que permiten explicar el efecto de la distancia y los componentes externos que afectan el nivel de intensidad (Hurtado, 2012), por tanto al final de los resultados se plantea un análisis matemático sobre los procesos y condiciones que dan origen a dicha situación.

En la investigación se construye y elabora un modelo matemático que basado en teorías y aplicaciones computacionales permite calcular las predicciones de los niveles de potencia de la señal que se intenta medir en un punto determinado; todo es esto se logra usando el método científico (Abreu, 2012) para corroborar con los resultados de los datos de potencias medidas.

#### **4.3. Desarrollo de la metodología experimental**

De acuerdo a los aportes de (Mousalli-Kayat, 2015) el enfoque cuantitativo reconoce al método científico como el único camino para hacer ciencia, para ello toma como referentes a Damiani, Bunge y Molina 2016, quienes expresan que no es una simple formulación o receta para lograr la representación analítica, debe cumplirse los criterios la comprensión del procedimiento para la formulación y realizar la correspondiente comprobación de la hipótesis que se plantea por medio de la experimentación minuciosa, es decir , partir de lo general a la particularidad de los hechos y eventos obtenidos del objeto de estudio en el campo donde se ejecuta el ejercicio experimental.

De forma sucinta las etapas del método científico en su forma sistémica se acuerdo a (Hernandez Sampieri et al., 2018) y (Mousalli-Kayat, 2015) contemplan precisar sobre lo siguiente:

- a) Identificación de la realidad en estudio.
- b) Formulación de hipótesis a partir de la teoría.
- c) Medición del fenómeno, con el uso de instrumentos válidos y confiables.

d) Análisis de los datos, aplicación de las técnicas estadísticas para contrastar las hipótesis formuladas.

e) Conclusión, a partir del análisis de los datos se aprueban o rechazan las hipótesis formuladas.

Con base en esta realidad científica y con una perspectiva metodológica centrada en la realidad, el estudio permite que con la ayuda de medios tecnológicos asequibles y de bajo costo, facilitar la labor de la investigación para proponer una metodología completamente experimental de campo; utilizada de forma ágil para abordar el problema de la investigación (como se observa en la figura 21) a partir de: los objetivos, la teoría, las variables y las hipótesis la generación de un modelo matemático ajustado a las condiciones del medio (Espinoza, 2014).



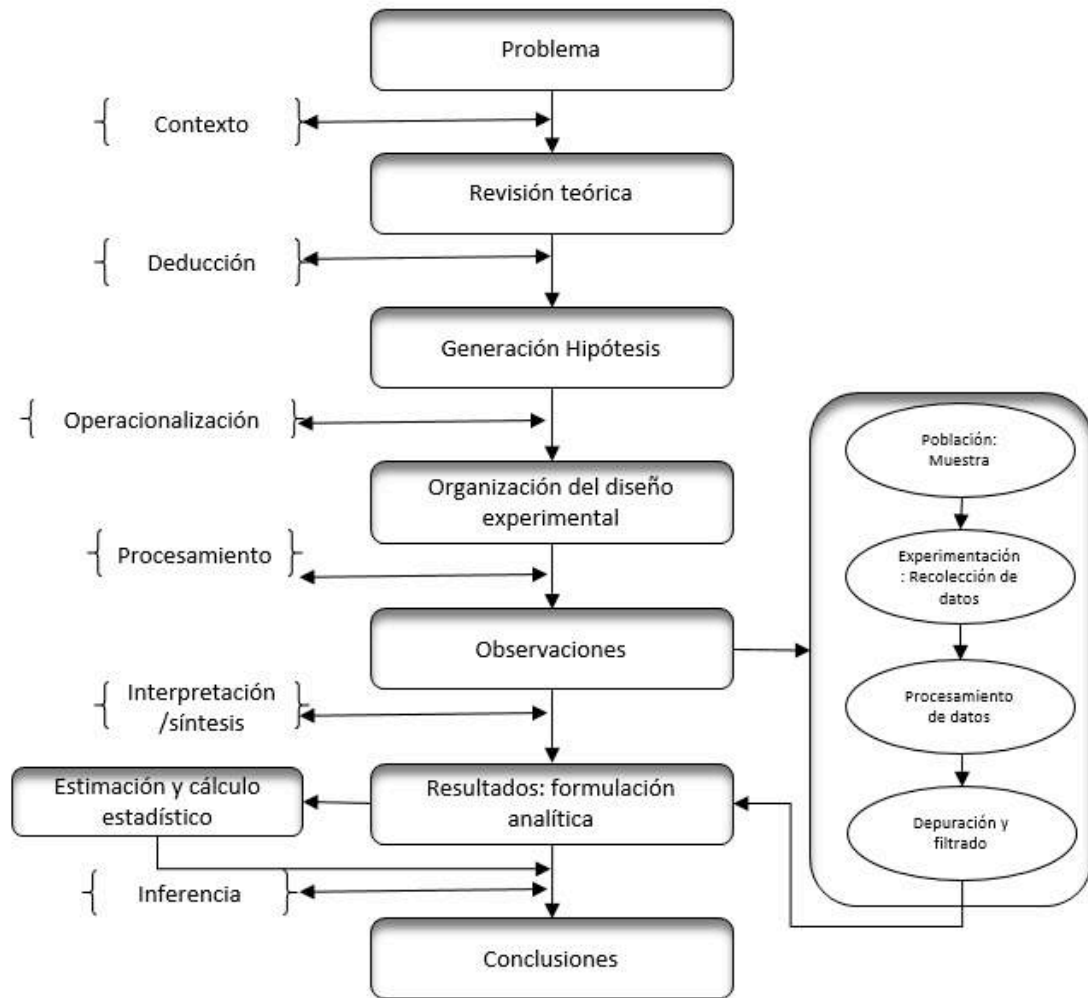


Figura 21: Modelo metodológico experimental.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.1. Plantear el problema

¿Es posible realizar las medidas de potencia de las estaciones de radio de servicio móvil celular o inalámbrico para delimitar un área de cobertura y la calidad del servicio?

Para tal fin se plantea generar una expresión matemática para determinar, por ejemplo, los niveles de potencia de recepción de un enlace exterior trabajando en la frecuencia de la

banda de las tecnologías 3G /4G en ambiente urbano a través de las mediciones realizadas en campo.

Con la inquietud científica generada por el planteamiento del problema el investigador en particular establece el primer acercamiento a la realidad del objeto de estudio, basado en las experiencias vividas y dudas, o tomando como referencia un problema en particular de la ingeniería que se presenta a diario en su labor como ingeniero, de allí el investigador debe poseer una actitud creativa para dar solución al problema, haciendo una representación sistémica con planteamientos concretos de las posibles inquietudes que han surgido desde las fuentes de problematización (Mousalli-Kayat, 2015).

#### **4.3.2. Revisión teórica**

El estado del arte está desarrollado en el capítulo 2 en donde se describen los diferentes tipos de modelos utilizados en ambientes exteriores para el apoyo de la investigación, además el proceso de descripción de la metodología tiene como referencias las investigaciones realizadas por (Herrera, 2013), (García Nelson et al., 2012), (Herrera, J. ; Villamizar, 2014), (Herrera, & Trujillo, 2019), de donde se obtienen los insumos para la construcción de un modelo de referencia sobre las mediciones realizadas en ambiente exterior en una celda móvil con tecnología 3G/4G, realizad durante el año 2018.

#### **4.3.3. Generar una hipótesis**

En esta etapa del proceso se plantea con claridad la idea que el investigador tiene sobre el fenómeno a estudiar en campo, es el planteamiento de una conjetura planteada por medio de la recolección de los datos de acuerdo a la observación previa del fenómeno; para realizar la comprobación de la hipótesis se requiere de un estudio minucioso de las teorías científicas que permita plantear una metodología y obtener unos resultados consistentes.

Bajo estas consideraciones con los niveles de medidas de potencia y aplicando la estadística base se genera un modelo de regresión no lineal (en el caso de estudio en particular) para proveer una expresión basada en: la observación, pruebas empíricas en campo y teorías ratificadas; como es el caso de los modelos de propagación comprobados para sistemas móviles desarrollados en la actualidad (Espinoza, 2018).

La elección de la prueba estadística se realiza con un análisis descriptivo de los datos como variables cuantitativas continuas, teniendo en cuenta el promedio de la potencia obtenida como medida de tendencia central junto con la desviación estándar como medida de dispersión (Flores-Ruiz et al., 2017) para poder generar la hipótesis.

Las características más importantes al momento de generar una hipótesis debe incluir procesos como: referirse a la situación real del campo de RF, establecer las variables a medir y finalmente comprobar, examinar o descartar la relación que puede existir entre las variables ya sea por la experiencia, técnicas empíricas o por medio de la observación.

#### **4.3.4. Organización del diseño experimental**

En esta etapa se realiza el análisis técnico con base en las recomendaciones y estándares Nacionales e Internacionales; como es el caso de la aplicación de las recomendaciones actualizadas de UTI-R en el documento “Manual sobre Comprobación Técnica del Espectro 2011” que contiene las últimas informaciones sobre todos los aspectos de comprobación técnica y es un referente del cual se toman algunos conceptos para considerar en las interpretaciones en la investigación, entre ellos están los siguientes:

“Las mediciones se realizan en presencia de condiciones que tienden a disminuir la precisión alcanzable, puede mejorarse algo la situación realizando mediciones agrupadas cuando las observaciones sean con aparatos portátiles y tomando el promedio de los resultados o efectuando registros continuos de la intensidad de campo, como es el caso de la toma de 60 muestras en un minuto, pero considerando el error en las mediciones y el ruido del sistema de medición” (Manual, 2011).

“La posible precisión en condiciones normales con instalaciones portátiles o móviles hace que la precisión lograda no se satisface en todos los casos por lo dispuesto en la recomendación (International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation SM.378-7, 2018), pero aun así, la capacidad de recepción omnidireccional”, hace de la antena de  $\lambda/4$  un instrumento útil para realizar mediciones de campo, para el caso en estudio (Recommendation P-1406-2 ITU-R, 2015).

Dentro de las recomendaciones ya existen apreciaciones como es el caso de la existencia de un nivel de confianza entre el 90% y el 95% del número de muestras tomadas al calcular la desviación estándar con un margen entre 6dB y 8 dB.

Al aplicar, por ejemplo, el modelo de cálculo teórico para la Pérdidas en Espacio Libre (PEL) con las características intrínsecas de los radios y al compararlo con los niveles de señal medidos en los ambientes semi urbanos, tomando como ejemplo la ubicación de la estación base fija a 6 m con respecto al piso; se observa que la potencia disminuye a medida que se aumenta la distancia entre el receptor y el transmisor.

Para las mediciones en campo se elige una estación base móvil en ambiente urbano, desde el punto de vista práctico las mediciones de potencias cerca del equipo transmisor en la

región de campo cercano se realizan con una aproximación de 40 longitudes de onda ( $40\lambda$ ) valorando la existencia de las fluctuaciones de la potencia, que son producto del efecto de multi trayectoria de acuerdo a la referencia que expone (Manual, 2011), sin embargo, para la práctica de campo se tomaron  $150 \lambda$  de espaciamiento entre cada punto de medida hasta alcanzar una distancia de 700m para la celda caracterizada.

El diseño experimental debe mostrar la relación causa y efecto entre las variables, tener presente el tiempo, la forma, el lugar, los instrumentos de trabajo y delimitar el tamaño de la unidad de pruebas con base en los objetivos propuestos.

#### 4.3.5. Observaciones y análisis

##### Campaña de medidas

Las mediciones se realizan en un área de la ciudad de Cúcuta utilizando como sonda de medida un dispositivo móvil, el experimento se realizan en un ambiente exterior en presencia de condiciones físicas reales para enlaces mixtos LOS y NLOS, para tal fin se establece ubicaciones de puntos de medidas de la intensidad de potencia sobre cuatro móviles simultáneamente ubicados en un recorrido cada 50 metros en cada uno de los cuatro puntos cardinales (Herrera, & Trujillo, 2019), sobre una celda arbitraria con un transmisor ubicado a una altura de 22 metros; la distancia a través de la reflexión sobre el terreno con línea de vista está dada por la ecuación 66:

$$\text{distancia visual} = \sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2} \quad \text{Ecuación 66}$$

Para:  $d$  es la distancia en metros,  $h_t$  es la altura del transmisor y  $h_r$  es la altura del receptor.

Para confirmar y asegurar la zona de trabajo en la campaña de medidas se utilizan la aplicación cellmapper.net o cualquier otras que se encuentra en la web y que permite la ubicación de cada uno de los punto como se observa en la **figura 22**, de donde se toman las muestras en el trazados de la trayectoria de la ruta que se va a confinar para obtener el modelo con base en mediciones de potencia.

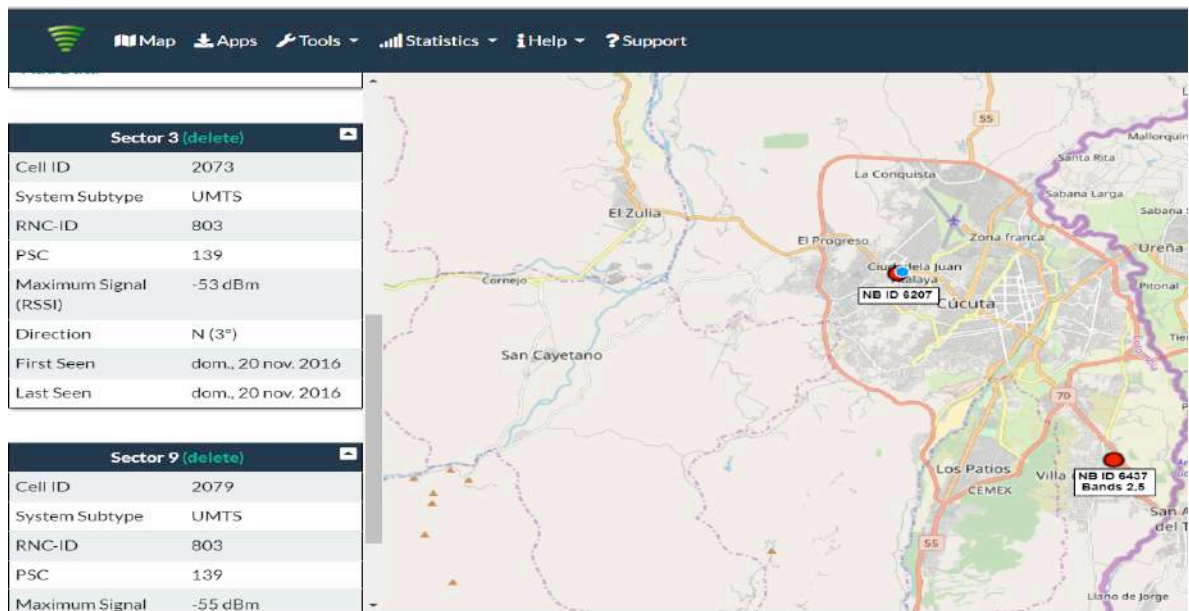


Figura 22. Mapeo de celdas de na estación base.

Fuente: extraído en línea de: <https://www.cellmapper.net/>

### **Configuración equipos activos**

En los dispositivos móviles se instala y configura la aplicación para realizar la medición teniendo en cuenta en la captura los parámetros de: identificación de la celda (CID), el número del radio controlador (RNC), tipo de tecnología (TYPE), la red (NET), Received Signal Strength Indicator (RSSI), la fecha y hora.

En las celdas transmisoras se considera que el nivel de potencia oscile entre 30,5dBm (1,14W) hasta 43dBm (20W), según la regulación definida por la 3GPP y sus especificaciones técnicas (Herrera, & Trujillo, 2019).

### ***Pruebas de conectividad***

Las medidas se realizan a pie con el móvil ubicando a una altura de 1,5 m sobre el nivel del piso, se activa la aplicación y se verifica el registro en la pantalla del nivel del RSSI.

El nivel de potencia promedio recibido con mediciones realizadas con recorridos a pie, para HSPA es de -90dBm en ambientes exteriores desde un Equipo de Usuario (UE), con un porcentaje de localización de borde de celda del 90% y para los límites cercanos de alta interferencia y alta carga es de -120dBm cuando el borde de la celda alcanza un 95%, teniendo en cuenta las recomendaciones técnicas se inicia el proceso de captura de los datos.

En la práctica la medida de señal capturada generalmente se expresan como el valor de potencia de la señal piloto, (received signal code power ) RSCP en caso de 3G o RSRP (Reference Signal Received Power) en caso de 4G (3GPP specification., 2008).

#### ***4.3.5.1. Obtener la muestra***

Para determinar el número de muestras se utiliza la ecuación (Peck et al., 2016):

$$n = \frac{(N * Z^2 * \sigma^2)}{(e^2 * (N - 1)) + (\sigma^2 * Z^2)} \quad \text{Ecuación 67}$$

#### **4.3.5.2. Recolección de datos**

La recomendación de la UIT (Bureau, 2011) establece que, salvo cuando existan limitaciones debidas al nivel de ruido del receptor, ruido atmosférico o interferencias externas, la precisión que cabe esperar en las mediciones de intensidad de campo es menor que  $\pm 3$  dB para frecuencias superiores a 30 MHz, por lo anterior, se procedió a obtener un numero de 240 muestras necesarias para asegurar cierto grado de fiabilidad con un nivel de potencia promedio, procesando y seleccionando una desviación típica ( $\sigma$ ), la varianza ( $\sigma^2$ ) y error estándar de cada uno de los puntos de medida. Como lo sugiere (Vera Rivera et al., 2015) es imprescindible considerar: elementos reflectores, pérdidas por densidad de los cuerpos, atenuación, elementos dispersores, elementos reflectores, entre otros.

En la recopilación de datos se debe tener presente los factores que afectan un enlace de microondas, tales como: pérdidas por densidad de los cuerpos, absorción de energía de cuerpos metálicos, objetos en movimiento y demás que el investigador o ingeniero de campo considere.

#### **4.3.5.3. Procesamiento de los datos**

El resultado de una única medida puede coincidir con el valor mínimo o máximo de la captura promedio, situación que se puede ver influenciada por la altura de la antena receptora, la estación del año, la climatología, la vegetación, la humedad del entorno, el equipo de medida y captura de los datos, que falsea la medición realizada (Bureau, 2011) para lograr conservar la precisión de las medidas, éstas se ejecutan de forma continua por ruta en condiciones ambientales normales y en jornadas de tiempo similares, para realizar el adecuado procesamiento estadístico de los mismos.



En el análisis de redes celulares con asignación dinámica de canales es posible la determinación del comportamiento de una célula en su conjunto (Bureau, 2011), calculando el valor promedio de la potencia que recibe el móvil dependiendo de la cantidad de recursos utilizados en la celda, como resultado se muestra un ejemplo en la tabla 8 del procesamiento de los estadístico específicamente para una ruta denominada norte para el móvil 1 (Herrera et al., 2019).

Tabla 8: Obtención de los estadísticos para las cuatro rutas para un móvil 1.

Statistics North	Point 0	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	Point 9	Point 10	Point 11	Point 12	Point 13	Point 14
Distance with line of sight (m)	22	55	103	152	201	251	301	351	401	451	501	550	600	651	700
Average power l	-59.2	-62.9	-67.7	-67.2	-59.1	-60.1	-61.2	-66.6	-63.3	-64.6	-71.3	-74.2	-77.1	-74.3	-78.5
Deviation l	1.99	4.57	2.90	2.52	2.04	4.09	3.69	3.11	3.82	2.67	2.81	2.84	3.04	3.74	3.07
Variance l	3.30	8.94	11.25	7.33	3.06	16.8	15.32	12.77	19.04	6.02	8.92	9.32	9.92	17.6	10.5
Minimum Power l	-67	-67	-67	-69	-63	-75	-75	-67	-67	-73	-75	-74	-67	-70	-74
Maximum Power l	-55	-55	-55	-57	-51	-55	-57	-59	-55	-57	-61	-59	-57	-56	-59
Median l	-61	-61	-61	-63	-57	-63	-65	-63	-61	-65	-69	-67	-62	-63	-67
Standard error l	0.146	0.369	0.204	0.191	0.153	0.323	0.303	0.369	0.294	0.210	0.231	0.242	0.228	0.286	0.247

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.5.4. Filtrado de los datos

El resultado de la información redundante se filtra seleccionando solo el nivel de potencia medido en dBm (RSSI) para el caso de sistemas inalámbricos WI-Fi, para el caso de 3G, la medición de la señal capturada se expresa generalmente como el valor de la potencia del código de la señal piloto recibida (RSCP) y para 4G se expresa como la potencia de la señal de referencia recibida (RSRP).

Los datos obtenidos por el software se guardan en un archivo en formato de texto plano, después se traslada a una hoja de cálculo y desde éste se filtran los datos más relevantes de cada registro tomado segundo a segundo durante 180 segundos, con el propósito de obtener

un dato promedio para depurar los errores tales como: error de tiempo de inicio de la medida, movimientos involuntarios del operador que toma las medidas, error en las capturas del software, entre otras (International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation SM 2256-1, 2016).

#### **4.3.6. Formulación analítica**

Generar la expresión matemática (Marion & Esquivel, 2006) para calcular analíticamente los niveles de potencias y contrastarlos con los datos obtenidos en la mediciones para cada uno de los enlaces, inicialmente mediante una estimación logarítmica (Ambroziak & Katulski, 2014) se logra una representación de los datos y se ajustan a un modelo de regresión no lineal más adecuado, asumiendo un ajuste de confianza dentro del rango de datos tomados experimentalmente.

Para el caso de estudio sólo se dispone de información general sobre el entorno, por tanto, puede realizarse una estimación de las pérdidas de trayecto a partir de mediciones efectuadas en situaciones similares (Recommendation P-1406-2 ITU-R, 2015), tal estimación debe ser de naturaleza estadística.

Como existe desvanecimientos rápidos debido al multi trayecto que se produce en la escala de unas pocas longitudes de onda, se puede representar mediante la distribución de Rayleigh o Rice; si es el caso de desvanecimiento general la señal puede modelarse mediante la distribución de Nakagami-Rice (Recommendation P-1057-4, 2007).

Es posible determinar el desvanecimiento lento mediante las mediciones de la distribución de la intensidad de la señal, de manera que la variabilidad será mucho mayor en una zona extensa que en una zona reducida, por tanto, la desviación típica ( $\sigma_L$ ) para el trayecto

de una longitud confinada puede estimarse para zonas urbanas llanas como se detalla en la ecuación 68 (Recommendation P-1406-2 ITU-R, 2015):

$$\sigma L = 2,7 + 0,42 * \log\left(\frac{f}{100}\right) + 1,01 \log^2\left(\frac{f}{100}\right) \text{ dB} \quad \text{Ecuación 68}$$

Ecuación válida para frecuencias de trabajo entre 100 Mhz hasta 3000Mhz.

Con la utilización de software estadístico o similar, se analizan y se aplican las técnicas de regresión no lineal utilizadas en el desarrollo de modelos experimentales obtenidos a partir de mediciones para la estimación de la cobertura en redes 3G y 4G (Cornejo & Rebolledo, 2016).

Se agrupan las mediciones de cada uno de los ambientes a analizar categorizados anteriormente en grupos de medidas de acuerdo a área geográfica de influencias y se obtiene los datos promedios de los niveles de recepción de potencia.

Se selecciona el método de regresión no lineal para estimar una función de la forma:

$$Lp(\text{dBm}) = A + B * n * \log(d) + E \quad \text{Ecuación 69}$$

Donde “A” es un factor que incluye las pérdidas de potencia con la altura del transmisor, múltiples reflexión, obstáculos, entre otros, “n” es el exponente de pérdidas de la potencia con la distancia y “E” es el factor de corrección (Cui et al., 2016) este varía de acuerdo al ambiente de trabajo caracterizado (Qaraqe et al., 2013).

Se observa que la potencia de recepción varía con el logaritmo de la distancia a medida que se realizan las medidas en cada punto. Ahora bien, dado que las mediciones realizadas se refieren al nivel de potencia recibida y no a las pérdidas de la señal.

### **III. Tercera etapa de la investigación: Aplicación de la metodología en el diseño de un modelo de propagación experimental**

#### **4.4. Evaluación de los resultados contrastando con los diferentes modelos de propagación existentes**

En esta sección se obtienen las gráficas que relacionan potencia con respecto a distancia o la potencia con respecto a la altura de las bases de datos u hojas de cálculo.

Se realizan las comparaciones con los modelos estandarizados versus el modelo obtenido para inferir sobre la existencia de una tendencia de la curva de alejarse de los niveles de potencia y cómo obtener una mejor respuesta a medida que se aumenta la potencia o realizar los ajustes correspondientes.

El objetivo final de todo modelo empírico propagación es el de predecir el nivel de intensidad de la potencia de forma estadística para el área de cobertura estimada, considerando los factores físicos más significativos, al realizar un consolidado global de todas las medidas de acuerdo a la zona de influencia, se toma como ejemplo las potencias obtenidas en un recorrido para un ruta denominada oriente de las mediciones realizadas con cuatro móviles de forma simultánea, como se observa en la tabla 9.

Tabla 9: Niveles de potencias recibidas en cuatro móviles para la ruta oriente

Average power east (dBm)	Point 0	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	Point 9	Point 10	Point 11	Point 12	Point 13	Point 14
Total average east	-57,61	-57,7	-63,4	-64,70	-69,33	-69,3	-70,6	-73,4	-74,5	-76,6	-75,43	-75,45	-73,02	-74,16	-73,44
Mobile average 1	-57,7	-60,54	-67,2	-64,3	-69,9	-74,4	-71,5	-68,56	-78,0	-75,4	-72,9	-73,2	-76,7	-74,1	-73,1
Mobile average 2	-61,13	-64,39	-60,7	-54,0	-74,5	-84,4	-78,7	-71,9	-70,7	-75,5	-68,42	-64,93	-73,13	-71,96	-66,68
Mobile average 3	-57,0	-53,22	-57,7	-75,2	-70,3	-61,4	-56,2	-69,4	-65,9	-74,8	-83,26	-87,40	-70,44	-79,08	-85,33
Mobile average 4	-54,5	-52,66	-67,5	-65,1	-62,5	-57,0	-75,8	-84,0	-83,2	-80,9	-77,0	-76,1	-71,7	-71,3	-68,6

Fuente: Elaboración propia

Del resultado de la agrupación de los estadísticos de la potencia promedio para los 14 puntos de medida se obtiene una curva logarítmica general de la ruta oriente que representa la variación de la potencia con respecto a la distancia de acuerdo a la ecuación 70:

$$y = -7,597 * \ln(x) - 55,8 \text{ (dBm)} \quad \text{Ecuación 70}$$

Incluyendo el factor de desvanecimiento lento  $\sigma L$  en dicha ecuación se la ecuación 71 con el factor de corrección a trabajar:

$$y = -7,597 * \ln(x) - 55,8 \text{ (dBm)} - 3,96 \text{ dB} \quad \text{Ecuación 71}$$

Analizando la curva de regresión no lineal se obtiene un coeficiente de correlación que es bueno con un valor de  $R^2 = 0,8952$  y representa el porcentaje de variación de la variable de respuesta de potencia como la variable de predicción con respecto a la distancia, en la figura 23 se observan los resultados analíticos de las potencias promedio obtenidas por cada uno de los móviles y el promedio global utilizando la ecuación 71.

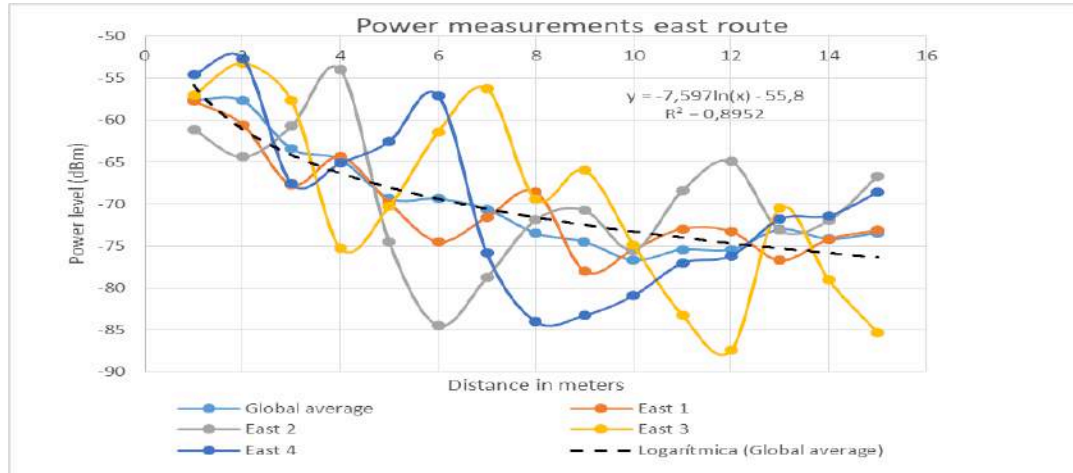


Figura 23. Curva de regresión no lineal promedio para la ruta oriente.

Fuente: Elaboración propia

Al realizar la prueba de los valores en dicha expresión 71 se observan valores de desviación típica que oscilan entre 4dB y 6dB al comparar con el valor de la desviación típica obtenida en la ecuación 68 para la frecuencia de 850Mhz el valor oscila alrededor de 3.96dB. De igual forma, se realizó el experimento para las otras tres rutas y se obtuvieron las expresiones representadas en las ecuaciones 72,73 y 74 (Herrera et al., 2019):

Para la ruta *norte*, con un  $R^2 = 0,4442$

$$y = -5,574 * \ln(x) - 56,825 \text{ (dBm)} \quad \text{Ecuación 72}$$

Para la ruta *sur*, con un  $R^2 = 0,1779$

$$y = -2,44 * \ln(x) - 60,554 \text{ (dBm)} \quad \text{Ecuación 73}$$

Para la ruta *occidente*, con un  $R^2 = 0,6671$

$$y = -5,194 * \ln(x) - 56,519 \text{ (dBm)} \quad \text{Ecuación 74}$$

La interpretación de R cuadrado es la proporción de la varianza de la potencia que se atribuye a la distancia y que refleja una dependencia directa con la potencia recibida de manera muy regular, pero su nivel de ajuste varía significativamente y puede ser deficiente de acuerdo

a los datos obtenidos para las ecuaciones citadas, con el nivel de confianza del 44,42 %, 17,79% y 66,71% respectivamente, en estos casos se debe realizar la toma de mas muestra o en su defecto buscar un ajuste que por lo menos indique un nivel de confianza por encima del 90%.

Finalmente, se realizar una comparacion global entre los datos medidos, la representación analítica obtenida, los modelos de propagacion Okumura-Hata, COST 231-Hata y COST 231 Walfisch-Ikegami, para descartar la funcionalidad del modelo o en su defecto confirmar que la expresión es un buen predictor y puede tener resultados buenos al comparar con los modelos científicamente ya establecidos.

De acuerdo a los niveles de potencia de señal medida y expresada como RSSI (Receive Signal Strength Indication) se puede clasificar la calidad de la señal del enlace de la siguiente manera (Soto, 2010):

- ❑ 80%: Señal muy baja. Problemas de conectividad, caídas del enlace.
- ❑ 70%: Enlace normal-bajo. Ocasionado por factores como la lluvia, viento, movimiento de vehículos y personas, desvanecimiento, obstrucción del follaje de los árboles.
- ❑ 60%: Enlace Bueno. Permite un ajuste estable para asegurar una conexión con un 80% de confiabilidad.
- ❑ 40% e inferiores: Enlace perfecto. Podemos conseguir tasas de transferencias buenas y estables.

También están las equivalencias en función de los dBm que se reciben en el receptor:

- Por encima de -70 dBm (números más cercanos a 0) = Excelente. Señal fuerte con máxima velocidad de datos.

- Entre -70 dBm a -85dBm = buena. Señal fuerte con velocidad de datos media.
- Entre -86 dBm a -100 dBm = Regular. Señal aceptable con velocidad de datos fiable.
- < -100 dBm = pobre. Bajísima cobertura y el rendimiento disminuirá
- A partir de -120 = Sin señal. Sin cobertura desconectado.

Para el caso de estudio se observa que debido al efecto de los objetos y obstáculos en la medida que el móvil se aleja del transmisor ocurren puntos ciegos debido a los obstáculos en las condiciones de LOS/NLOS que producen fluctuaciones generando una desviación típica de las potencias recibidas.

La distancia próxima a la cual se presenta el handover se percibe alrededor de 700 metros para la celda seleccionada en todos los trayectos de manera que se pueda conservar un nivel medio de potencia entre -76 dBm y -90 dBm.

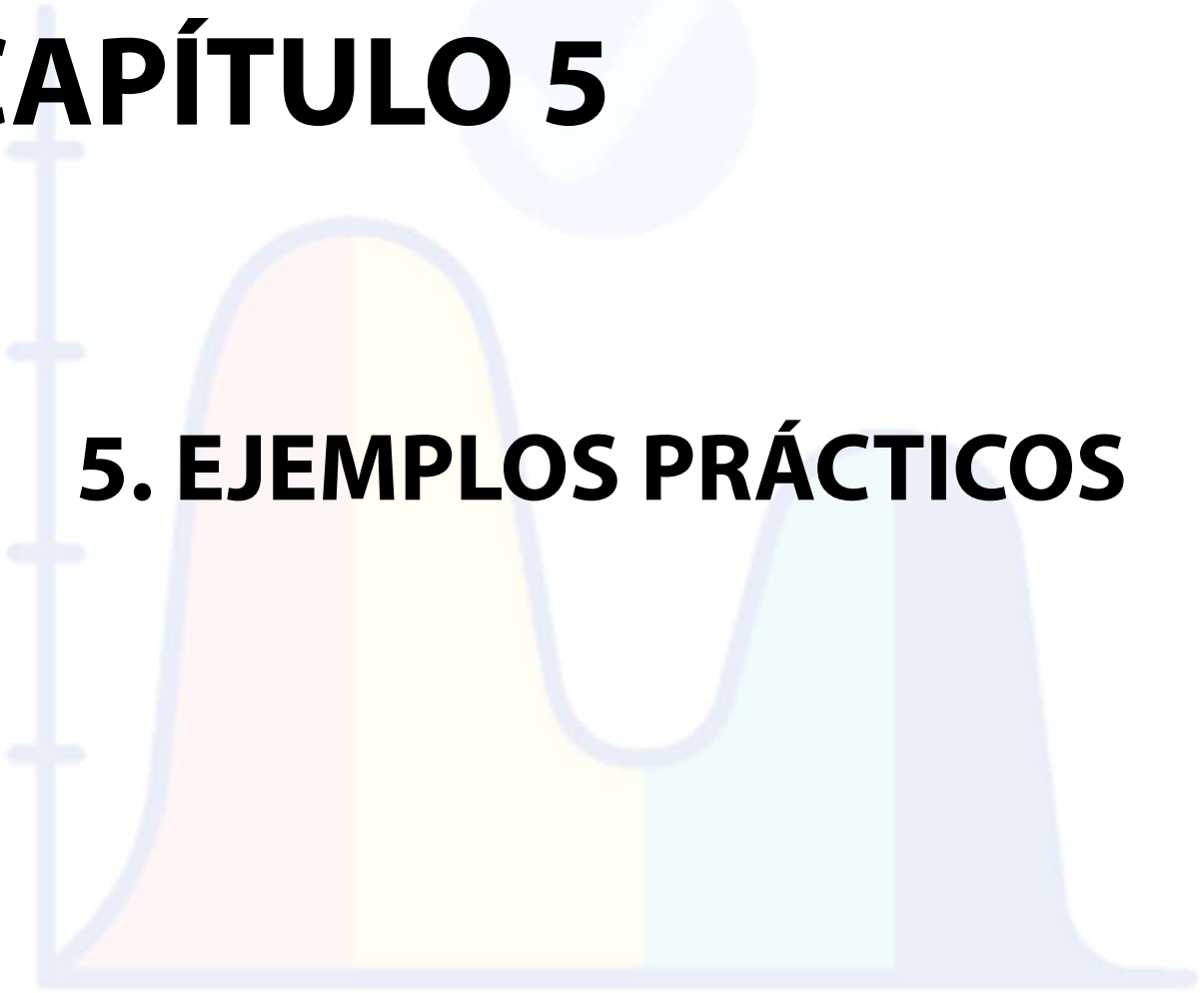
La probabilidad de éxito de los modelos empíricos radica en aumentar el número de puntos de medida y considerar las ubicaciones en donde se presentan cambios en las medidas en condiciones de trayectos mixtos terrestres (NLOS/LOS) para reducir los errores de predicción, además de incluir parámetros de ajuste como: la altura del receptor, la altura de la estación transmisora, efectos de apantallamiento, correcciones de ángulo sobre obstáculos del terreno, la variabilidad de las ubicaciones en las medidas, dispersión troposférica, entre otras.

Al comparar el modelo empírico con los modelos estándar se presenta una variación debido a que el modelo obtenido con el factor de ajuste representa los valores de potencia más cercanos a las medidas realizadas en campo, estas inferencias son el resultado del estudio realizado en el año 2017 para el cual se aplicó esta metodología y se generó un artículo científico (Herrera, & Trujillo, 2019).



# **CAPÍTULO 5**

## **5. EJEMPLOS PRÁCTICOS**



## CAPÍTULO 5

### 5. EJEMPLOS PRÁCTICOS

El ingeniero o profesional dedicado a la planificación de redes inalámbricas debe asegurar que los procesos de implementación de equipos de radio, ventanas de mantenimiento preventivo/correctivo y la actualización de los módulos hardware y software de infraestructura, puedan ser caracterizados y probados en campo; para descubrir las zonas de cobertura que mejor se adapten a las condiciones ambientales, fallas de funcionamiento y mejorar los requisitos de calidad del servicio de los clientes, para tal fin, a continuación se proponen dos ejemplos en una guía de trabajo independientes en campo para ejecutar las medidas de intensidad en campo para ambiente en interiores y exteriores (Rancy, 2015).

Las guías prácticas son similares en la forma y procedimiento excepto en las condiciones del tipo de sistemas de radio comunicaciones y el software que se utiliza para hacer la toma de las muestras en campo en ambientes considerados en interiores y exteriores.

#### **5.1. Guía práctica 1: Medidas de intensidad de campo para un ambiente interior para celdas WiFi**

##### 1) Identificación del sitio

EMPRESA: Universidad de Pamplona  
AREA: Programa ingeniería en telecomunicaciones.  
FECHA: 23 Agosto de 2018  
Hora: 07:00 a.m.  
Ubicación: Barrio Blanco  
Rango de frecuencia: 2400Mhz

*Jorge Enrique Herrera Rubio*

Unidad de medidas: dBm

Temperatura: 25°

Diseño: Ingeniero JORGE HERRERA RUBIO

Tipo de actividad: Medida de campo

Actividad: Comprobación de nivel de intensidad de una celda móvil con tecnología wifi

## 2) Objetivos

- ❑ Identificar y reconocer la distribución potencia de una celda en ambiente en interior.
- ❑ Calcular los niveles de potencia en recepción e identificar los factores que afectan un enlace.
- ❑ Realizar mediciones de intensidad de potencia.
- ❑ Obtener una expresión analítica que permita comprobar los resultados de las mediciones

## 3) Marco teórico

La gestión del espectro es la combinación de procedimientos administrativos, científicos y técnicos necesarios para garantizar una explotación eficaz del equipo y los servicios de radiocomunicación sin producir interferencia.

La finalidad de la gestión del espectro es maximizar la eficacia de utilización del espectro, minimizar la interferencia y eliminar las utilizaciones no autorizadas e inadecuadas del espectro. Las normas y reglamentos basados en la legislación pertinente constituyen una base reglamentaria y legal para el proceso de gestión del espectro. Las bases de datos de información, que contienen detalles de todos los usuarios autorizados del espectro, proporcionan la base administrativa y técnica para el proceso (Rancy, 2015).

El análisis de la información de estas bases de datos facilita el proceso de gestión del espectro cuyos resultados son las decisiones de atribución de espectro, asignaciones de frecuencia y concesión de licencias en el espectro. La comprobación técnica del espectro, la

inspección y la imposición legal aportan los medios necesarios para mantener la integridad del proceso de gestión del espectro (Manual, 2011).

El indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI por las siglas del inglés Received Signal Strength Indicator), es una escala de referencia (con relación a 1 mW) para medir el nivel de potencia de las señales recibidas por un dispositivo en las redes inalámbricas (típicamente WiFi o telefonía móvil).

Con las redes Wi-Fi es posible mediante equipo de radio o Access Point establecer una celda condicionada para realizar mediciones de niveles de potencia del espectro y realizar pruebas de campo. Con la ayuda de aplicaciones freeware como es el caso de: Network Stumbler, InSSIDer o Wi-Fi Analytics Tool, entre otros, es posible realizar pruebas de tipo test drive.

## 2) Materiales e insumos

- Programa InSSIDer o similar.
- Equipos de radio wifi en 2,4Ghz
- Cable UTP
- Extensión de alimentación con multi toma
- Hoja electrónica
- Programa estadístico

## 3) Equipos

- Computador portátil o equipo móvil

## 4) Procedimiento

Realizar las mediciones de los niveles de potencia seleccionando en un espacio confinado con las condiciones ambientales similares, las medidas se ejecutan en jornadas de

tiempo con los mismos horarios, teniendo en cuenta el diseño de una metodología de mediciones del espectro y el manual de comprobación técnica del espectro de la ITU (Rancy, 2015) (Manual, 2011).

6.1. Instalar el aplicativo de captura de datos InSSIDer o similar en el equipo portátil.

6.2. Configurar los parámetros del radio transmisor: nivel de potencia máximo, modo de operación, ganancia de antena, canal de transmisión, ancho de banda, clave de acceso.

6.3. Realizar el montaje del equipo transmisor en un mástil a una altura de 7 a 10 metros con antena direccional u omnidireccional en un mástil o torre.

6.4. Realizar la medida de referencia a una distancia de un metro con línea de vista desde el mástil hacia el equipo en donde se va a realizar la captura de los datos como punto de referencia inicial.

6.5. Ejecutar la aplicación y abrir un archivo .LOG con el nombre P0 capture los datos por 4 minutos en forma consecutiva, no debe tener activo el internet con otra red o servicio que altere las medidas, cierre todas las aplicaciones.

6.6. Guarde los datos cerrando el archivo .LOG, asignándole un nombre para cada punto de medida dentro de la ruta trazada, observe que la estructura es similar ejemplo de la tabla 10.

Tabla 10. Parámetros de captura de medición en un punto de medida.

Time	Name	SSID	Channel	Security	Signal Quality	Network Type	Rate

2	W	W	9							1/2/5
018-05-31T11:40:3.254Z	IFI_UPA_V [90:6C:AC:0B:78:69]	IFI_UPA_V [90:6C:AC:0B:78:69] RSSI: -51 dB Quality: 90% Channel 6	0:6C:AC:0B:78:69	IFI_UPA_V	51		PA2-Personal	0	nfrastructure	,5/6/6/9/11/12/12/13/

Fuente: Elaboración propia

6.7. Continúe las medidas de captura nuevamente cada 10 metros realizando el paso 6,5 y 6.6 hasta terminar el último punto de medición. Colocar el nombre del archivo, ejemplo: p0,p1...p10.txt y así sucesivamente hasta los 400 metro o la distancia máxima de acuerdo a la potencia máxima programada, como se muestra en el ejemplo de la figura 24.

P0.gpx	31/05/2018 6:31 a. m.	Archivo GPX	1.949 KB
P1.gpx	31/05/2018 6:37 a. m.	Archivo GPX	2.430 KB
P2.gpx	31/05/2018 6:44 a. m.	Archivo GPX	3.120 KB
P3.gpx	31/05/2018 6:51 a. m.	Archivo GPX	3.762 KB
P4.gpx	31/05/2018 6:59 a. m.	Archivo GPX	3.689 KB
P5.gpx	31/05/2018 7:04 a. m.	Archivo GPX	3.496 KB
P6.gpx	31/05/2018 7:10 a. m.	Archivo GPX	4.145 KB
P7.gpx	31/05/2018 7:18 a. m.	Archivo GPX	3.908 KB
P8.gpx	31/05/2018 7:25 a. m.	Archivo GPX	3.129 KB
P9.gpx	31/05/2018 7:31 a. m.	Archivo GPX	2.107 KB
P10.gpx	31/05/2018 7:38 a. m.	Archivo GPX	982 KB

Figura 24. Archivos que contiene la información fuente de las mediciones.

Fuente: Elaboración propia

6.8. Al finalizar todas la medidas: realizar el filtrado de los datos: fecha, hora, dirección MAC, nivel de potencia y nombre de la red, en una hoja electrónica o paquete estadístico.

6.9. Determinar los estadísticos básicos para el diseño e interpretación de los resultados, como se observa en el ejemplo de la figura 25.

<i>Columna1</i>	
Media	-77,4680851
Error típico	0,13895491
Mediana	-77
Moda	-77
Desviación estándar	1,9052538
Varianza de la muestra	3,62999204
Curtosis	3,21989959
Coefficiente de asimetría	-0,75300142
Rango	10
Mínimo	-83
Máximo	-73
Suma	-14564
Cuenta	188
Mayor (1)	-73
Menor(1)	-83
Nivel de confianza(95,0%)	0,27412067

Figura 25: Estadísticos básicos obtenidos de las mediciones. Fuente: Elaboración propia

6.10. Obtener un modelo de regresión que aproximen los datos medidos con los datos calculados por medio de una expresión matemática, del tipo:

$$L_{per} = -3,8233 * \ln(x) - 45,23256 \quad \text{Ecuación 76}$$

6.11. Calcular el exponente de pérdidas y potencia de recepción.

6.12. Compare el modelo obtenido con los modelos que aparecen a continuación y obtenga las conclusiones correspondientes.

Modelos de referencia y comparación: Log-Distance, Modelo simplificado basado en el número de muros y suelos, Dual Slope-Model, Keenan-Motley Model, Multi-Wall Model, Motley – Simplificado, Modelo de una pendiente, Ericsson múltiples rompimiento, Factor de

atenuación, Modelos basados en Ray-Tracing, Modelos FDTD y Modelo de Pérdida de Trayecto basado en COST-231.

Observaciones generales:

Nota: evite los obstáculos y objetos dentro de la ruta establecida, los parámetros dados por cada uno de los modelos de propagación debe consultarlos y ajustarlos de acuerdo al medio o ambiente donde se va a aplicar.

5) Nivel de riesgo

Eléctrico, exposición solar.

6) Bibliografía

- ✓ Balanis, C. A. (2016). Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons.
- ✓ Kwang-Cheng, Chen and Ramjee, P. (2009). Cognitive Radio Networks. (John Wiley & Sons Ltd, Ed.) (Third). Chippenham, England: Wiley.
- ✓ Oriol Sallent Roig, José Luis Valenzuela González, R. A. C. (2003). Principios de comunicaciones móviles.
- ✓ Rappaport, T. S. (2002). Wireless Communications Principles and practice. (P. Hall, Ed.). Prentice Hall: Prentice Hall.
- ✓ Rohde, & Schwarz. (2018). Marcando estándares en la comprobación técnica del espectro.
- ✓ Salvadè, A., Guggiari P., Lanini, M. (2004). Basis for a UMTS measurement recommendation. SUPSI-DTI Alta Frecuencia Phone.
- ✓ Zuluaga, J. M. R., Alzate, C. C. O., Gracia, J. B. O., Orozco, H. F. B., & Hoyos, E. A. (2015, May). Research about coefficient of variation for the measurement methodology of the electric field strength proposed by the UIT-R P. 1406-1 recommendation. In IEEE Colombian Conference on Communication and Computing (IEEE COLCOM 2015) (pp. 1-5). IEEE.
- ✓ Manual, I. T. U. R. (2002). Comprobación Técnica del Espectro.
- ✓ Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2011). Manual Comprobación Técnica del Espectro (Vol. 1). Ginebra, Suiza. Retrieved from [http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-S.pdf](http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-S.pdf)



## 5.2. Guía práctica 2: Medidas de intensidad de campo para un ambiente exterior (Outdoor) para celdas móviles 3G/4G/LTE

### 1) Identificación del sitio

EMPRESA: Telecomunicaciones Divergentes

AREA: Mantenimiento y planificación

FECHA: 23 Agosto de 20019

Hora: 07:00 a.m.

Ubicación: Avenida 0 Calle 15 Centro

Rango de frecuencia: 940Mhz

Unidad de medidas: dBm

Temperatura: 25°

Diseño: Ingeniero JORGE HERRERA RUBIO

Tipo de actividad: Medida de campo

Actividad: *Comprobación de nivel de intensidad de una celda móvil con tecnología 3G/4G*

### 2) Objetivos

- Identificar y reconocer la distribución potencia de una celda del Operador Telecomunicaciones en ambiente Outdoor
- Calcular los niveles de potencia en recepción e identificar los factores que afectan un enlace.
- Realizar mediciones de intensidad de potencia.
- Obtener una expresión analítica que permita comprobar los resultados de las mediciones

### 3) Marco teórico

La gestión del espectro es la combinación de procedimientos administrativos, científicos y técnicos necesarios para garantizar una explotación eficaz del equipo y los servicios de radiocomunicación sin producir interferencia.

La finalidad de la gestión del espectro es maximizar la eficacia de utilización del espectro, minimizar la interferencia y eliminar las utilizaciones no autorizadas e inadecuadas del espectro. Las normas y reglamentos basados en la legislación pertinente constituyen una base reglamentaria y legal para el proceso de gestión del espectro. Las bases de datos de información, que contienen detalles de todos los usuarios autorizados del espectro, proporcionan la base administrativa y técnica para el proceso (Manual sobre la Gestión nacional del espectro, 2015).

El análisis de la información de estas bases de datos facilita el proceso de gestión del espectro cuyos resultados son las decisiones de atribución de espectro, asignaciones de frecuencia y concesión de licencias en el espectro. La comprobación técnica del espectro, la inspección y la imposición legal aportan los medios necesarios para mantener la integridad del proceso de gestión del espectro (UIT & Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2011).

El indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI por las siglas del inglés Received Signal Strength Indicator), es una escala de referencia (con relación a 1 mW) para medir el nivel de potencia de las señales recibidas por un dispositivo en las redes inalámbricas (típicamente WIFI o telefonía móvil).

Con la aplicación Netmonitor, Network Cell Info lite, G-MON Pro o G-NETracer es posible realizar mediciones de niveles de potencia del espectro y realizar pruebas de campo para las tecnología 3G/4G/LTE, como se muestra en el ejemplo siguiente.

#### 4) Materiales e insumos

- APP Netmonitor o similar.
- Hoja electrónica
- Programa estadístico

*Jorge Enrique Herrera Rubio*

5) Equipos

- Equipo móvil o teléfono móvil

6) Procedimiento

Realizar la toma de muestras de los niveles de potencia de una celda móvil en funcionamiento en un ambiente urbano o sub urbano en jornadas de tiempo con los mismos horarios y condiciones similares, teniendo en cuenta el diseño de una metodología de mediciones del espectro y el manual de comprobación técnica del espectro de la ITU (Manual sobre la Gestión nacional del espectro, 2015) (UIT & Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2011).

6.1) Instalar la APP en el equipo móvil

6.2) Realizar la medida de referencia a una distancia de cinco metros con línea de vista desde el mástil donde está el equipo de la estación base desde el pie de la torres hacia la dirección norte, sur, oriente y occidente.

6.3) Ejecutar la aplicación y abra un archivo .LOG con el nombre P0 capture los datos por 4 minutos en forma consecutiva, no debe tener activo el internet con otra red o servicio que altere las medidas, cierre todas las aplicaciones.

6.4) Guarde los datos cerrando el archivo .LOG, observe que la estructura es similar ejemplo de la tabla 11.

Tabla 11. Parámetros de captura de medición en un punto de medida de una celda móvil

Date / Time	Latitude	Longitude	Accurac y	Cell ID	LAC/TA C	MC C	MN C	Color	RSS I	Type
9/03/2017 18:10	79.183.09 8	-724.935.834	23	40684	8004	732	101	#ffb30 0	-105	UMTS
9/03/2017 18:10	791.827.8 8	-724.934.528	4	40684	8004	732	101	#ffb30 0	-105	UMTS
9/03/2017 18:10	79.183.48 6	-724.935.372	23	40684	8004	732	101	#ffe00	-99	UMTS
9/03/2017 18:10	791.828.4 0	- 7.249.344.49	3	40684	8004	732	101	#ffe00	-99	UMTS
9/03/2017 18:10	79.182.70 9	-724.936.296	23	40684	8004	732	101	#5eff0 0	-71	HSPA +
9/03/2017 18:10	791.827.9 6	- 7.249.344.22	3	40684	8004	732	101	#5eff0 0	-71	HSPA +
9/03/2017 18:11	79.183.09 8	-724.935.834	50	40684	8004	732	101	#80ff0 0	-77	HSPA +
9/03/2017 18:11	791.828.2 2	- 7.249.344.86	3	40684	8004	732	101	#80ff0 0	-77	HSPA +
9/03/2017 18:11	79.182.82 3	- 7.249.344.87	3	40684	8004	732	101	#67ff0 0	-73	HSPA +
9/03/2017 18:11	79.183.09 8	-724.935.834	23	40684	8004	732	101	#73ff0 0	-75	HSPA +
9/03/2017 18:11	791.826.3 5	-724.934.637	3	40684	8004	732	101	#73ff0 0	-75	HSPA +
9/03/2017 18:11	791.826.3 5	-724.934.639	3	40684	8004	732	101	#5eff0 0	-71	UMTS
9/03/2017 18:11	79.183.09 8	-724.935.834	23	40684	8004	732	101	#5eff0 0	-71	UMTS
9/03/2017 18:11	791.826.3 4	-72.493.464	3	40684	8004	732	101	#5eff0 0	-71	UMTS

Fuente: Elaboración propia

6.5) Continúe las medidas de captura nuevamente cada 50 longitudes de ondas de separación entre los puntos de medida realizando el paso 6.3 y 6.4, hasta terminar las medidas. Colocar el nombre del archivo, ejemplo: distancia0, distancia 1,... distancia 10.txt y así sucesivamente hasta una distancia de 1000 metro, como se muestra en el ejemplo de la **figura 26**, recuerde cambiar el nombre al archivo antes de iniciar las captura, ya que el programa asigna automáticamente el nombre de cada archivo.











 gmon_gsm_rxl_2017_11_16_06_15_08.kml	16/11/2017 6:19 a. m.	Archivo KML	92 KB
 gmon_gsm_rxl_2017_11_16_06_15_08.txt	16/11/2017 6:19 a. m.	Documento de tex...	36 KB
 gmon_gsm_rxl_2017_11_16_06_19_39.kml	16/11/2017 6:23 a. m.	Archivo KML	96 KB
 gmon_gsm_rxl_2017_11_16_06_19_39.txt	16/11/2017 6:23 a. m.	Documento de tex...	42 KB
 gmon_gsm_rxl_2017_11_16_06_24_28.kml	16/11/2017 6:28 a. m.	Archivo KML	86 KB
 gmon_gsm_rxl_2017_11_16_06_24_28.txt	16/11/2017 6:28 a. m.	Documento de tex...	39 KB
 gmon_gsm_rxl_2017_11_16_06_28_53.kml	16/11/2017 6:33 a. m.	Archivo KML	101 KB
 gmon_gsm_rxl_2017_11_16_06_28_53.txt	16/11/2017 6:33 a. m.	Documento de tex...	43 KB
 gmon_gsm_rxl_2017_11_16_06_33_50.kml	16/11/2017 6:38 a. m.	Archivo KML	106 KB
 gmon_gsm_rxl_2017_11_16_06_33_50.txt	16/11/2017 6:38 a. m.	Documento de tex...	39 KB

Figura 26. Archivos que contiene la información fuente de las mediciones.

Fuente: Elaboración propia

6.6) Al finalizar todas la medidas: realizar el filtrado de los datos: fecha, hora, celda, LAC, MCC, MNC, RSSI y Type, en una hoja electrónica o paquete estadístico.

6.7) Determinar los estadísticos básicos para el diseño e interpretación de los resultados, obtenidos de la **tabla 11**.

6.8) Obtener un modelo de regresión que aproximen los datos medidos con los datos calculados por medio de una expresión matemática, del tipo:

$$L_{per} = -4,643 * \ln(x) - 65,23256 \quad \text{Ecuación 77}$$

6.9) Calcular el exponente de pérdidas y potencia de recepción.

6.10) Compare el modelo obtenido con los modelos que aparecen a continuación y obtenga las conclusiones correspondientes.

Modelos de referencia y comparación: Okumura-Hata, Walfish-Bertoni, Walfish-Ikegami

The COST 231–Walfish–Ikegami, The COST 207 GSM Model, Cost -231, the 3GPP Spatial Channel Model, The ITU-Advanced Channel Model, Erceg C, Modelo de Xia

Observaciones generales:

Evite los obstáculos y objetos dentro de la ruta establecida, los parámetros dados por cada uno de los modelos de propagación debe consultarlos y ajustarlos de acuerdo al medio o ambiente donde se va a aplicar.

7) Nivel de riesgo

Eléctrico, exposición solar.

8) Bibliografía

- ✓ Khan, K. A. (2019). Measurement of 3G (WCDMA) Radio Statistics in Sub Urban Region of South-Western Ethiopia. International Journal of Science and Research (IJSR), 8(12), 645-649.
- ✓ Álvarez, F., Zuluaga, S., & Peláez, S. P. (2018). Libro de resúmenes.
- ✓ Kwang-Cheng, Chen and Ramjee, P. (2009). Cognitive Radio Networks. (John Wiley & Sons Ltd, Ed.) (Third). Chippenham, England: Wiley.
- ✓ Rappaport, T. S. (2002). Wireless Communications Principles and practice. (P. Hall, Ed.). Prentice Hall: Prentice Hall.
- ✓ UIT, U. I. de T. (2011). Manual de Comprobación técnica del espectro. Manual, 768.
- ✓ Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2011). Manual Comprobación Técnica del Espectro (Vol. 1). Ginebra, Suiza. Retrieved from [http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-S.pdf](http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-S.pdf)

- ✓ Zuluaga, J. M. R., Alzate, C. C. O., Gracia, J. B. O., Orozco, H. F. B., & Hoyos, E. A. (2015, May). Research about coefficient of variation for the measurement methodology of the electric field strength proposed by the UIT-R P. 1406-1 recommendation. In IEEE Colombian Conference on Communication and Computing (IEEE COLCOM 2015) (pp. 1-5). IEEE.
- ✓ Manual, I. T. U. R. (2002). Comprobación Técnica del Espectro.

### **5.3. Resultados esperados en la práctica de campo.**

El esfuerzo del trabajo en campo en el área de la medición y supervisión del espectro se ve reflejado en que el ingeniero debe en lo posible obtener resultados experimentales como:

Mitigar las pérdidas debidas a los obstáculos que se presentan en el medio.

Considerar el crecimiento de las redes en la medida que los servicios en telecomunicaciones crecen.

En las mediciones respetar las condiciones técnicas de los equipos bajo prueba y las reglamentaciones existentes.

Mediante las mediciones experimentales es posible realizar una presentación analítica y aproximada de los niveles de potencia con un modelo experimental.

Observar la calidad, precisión y ajustes de los equipos a utilizar como también de los aplicativos con el fin de obtener la mayor cantidad de variables que se puedan parametrizar.

Con herramientas de bajo costo es posible realizar estudio de test drive de forma que se puedan obtener resultados apreciables en campo.

Existe la posibilidad de comprobar por medio de modelos normalizados los valores de potencia y otros parámetros para obtener los mejores niveles de potencia que se pueden predecir según el ambiente de prueba.

## CONCLUSIONES

A continuación se relacionan algunas estimaciones encontradas a lo largo del trabajo expuesto:

Con el método de ajuste mediante extrapolación de los datos dependiendo de la frecuencia a trabajar y manteniendo las consideraciones citadas en el manual técnico del espectro se pueden realizar una corrección analíticamente aproximada para determinar la intensidad del campo eléctrico para las zonas urbanas, rurales y semi urbanas mediante el uso de modelos experimentales de regresión logarítmica a través de los cuantificadores proporcionados por los estadísticos básicos.

Es posible realizar correcciones del ángulo de despeje para zonas de recepción pequeñas, esto es efectivo cuando no hay obstáculos en la línea de visión tomando en cuenta que ángulo es pequeño y positivo; de lo contrario se presentan problemas de difracción causado por los obstáculos que deben ser evaluados y se deben hacer las correcciones necesarias.

Cuando se obtienen curvas de regresión no lineal con tendencia logarítmica de la potencia medida en decibeles, es significativo e importante el efecto que tiene el coeficiente de determinación (R) como la tolerancia del ajuste de los factores de corrección obtenidos en el experimento de campo, para explicar cómo una parte de la potencia disminuye con respecto a las distancias de cobertura.



Para mejorar la precisión de los modelos es ineludible ampliar el número de mediciones, identificar de la mejor forma el terreno, realizar las mediciones a las mismas horas y bajo las mismas condiciones atmosféricas y observar los efectos del ambiente en particular.

El uso de las predicciones estadísticas con las medidas de los niveles de potencia ayudan a proyectar la cobertura y disponibilidad de los equipos transmisores de radio para la prestación del servicio con el fin de hallar cuál sería el posible alcance.

La comparación de los resultados con el de los modelos establecidos internacionalmente son un guía para aceptar o negar que tan óptimo es el modelo que se obtiene de forma experimental cuando se prueban los datos obtenidos en campo en las expresiones matemáticas, sin embargo, el proceso de investigación solo tiene en cuenta la variable potencia y distancia.

La propuesta de un modelo práctico y empírico es posible de justificar cuando de forma experimental los niveles de potencia dan unos resultados apreciables de forma real, pero con las herramientas de hardware y software utilizadas no es factible obtener de forma exacta el ruido térmico, la relación de ruido de la portadora y otros parámetros que si tienen otros instrumentos de laboratorio.

Las recomendaciones dadas por al UIT son herramientas que facilitan los lineamientos a tener en cuenta cuando se realizan los confinamientos de medidas ya sea por frecuencia, terrenos, condiciones atmosféricas, tipo de tecnología y tipo de servicios, los cuales son parámetros y elementos que van a servir para: mejorar, corregir o construir un modelo de tipo experimental, porque son normas y estándares ya proba

## RECOMENDACIONES

Utilizar metodología ágiles que incluyan un proceso de análisis más riguroso y preciso como son: la inteligencia artificial, aprendizaje computacional y algoritmos genéticos, por mencionar algunos.

Para mejorar la alta precisión se deben realizar más pruebas para lograr una data más compleja y adecuada de forma que sea posible establecer factores de errores en la toma de muestras para garantizar el diseño de un modelo matemático apropiado.

El modelo debe mejorarse para que incluya variables como: la corrección de altura del móvil receptor, la potencia de transmisión, ajustar las ganancias de los equipo, caracterizar los exponente de pérdidas para los tipos de ambiente y tipos de tecnologías estudiadas, considerar en forma global los cambios rápidos y lentos por las fluctuaciones señal.

## REFERENCIAS BIOGRÁFICAS

- 3GPP specification., 36214-CR0006. (2008). 36214\_CR0006\_(Rel-8)\_R1-082608 (p. <http://www.3gpp.org/DynaReport/36214-CRs.htm>).  
<http://www.3gpp.org/DynaReport/36214-CRs.htm>.
- Abreu, J. (2012). Hipótesis, Método & Diseño de Investigación. Daena: International Journal of Good Conscience, 7(2), 187–197.
- Alonso, R., Bordón L., R., & Montejo, S. (2013). Estudio comparativo de los modelos de propagación de canal inalámbrico. <http://scielo.sld.cu/pdf/eac/v34n1/eac02113.pdf>
- Álvarez, F., Zuluaga, S., & Peláez, S. P. (2018). Libro de resúmenes.
- Ambroziak, S. J., & Katulski, R. J. (2014). Path loss modelling in the untypical outdoor propagation environments. 2014 31th URSI General Assembly and Scientific Symposium, URSI GASS 2014, 3–6. <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929655>
- Andreas, M. F. (2011). Book - Molisch. In Wiley Publishing. <https://doi.org/10.1002/9781119992806.fmatter>
- Arimas. (2019). Niveles de potencia en sistemas móviles. <https://arimas.com/141-rscp-rssi/>
- Balanis, C. A. (2016). Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons.
- Bayram, Y. (2014). PROPAGATION MODELS IN URBAN AREA FOR WIRELESS COMMUNICATION (pp. 1–60). Bilkent University.
- Bhuvaneshwari, A., Hemalatha, R., & Satyasavithri, T. (2016). Semi Deterministic Hybrid Model for Path Loss Prediction Improvement. Procedia Computer Science, 92, 336–344. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.388>
- Bureau, R. (2011). HANDBOOK Spectrum Monitoring. International Telecommunication Union (ITU), 168.

- Cablefree. (2019). Recomendaciones de intensidad de señal móvil. <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/rsrp-rsrq-measurement-lte/>
- Camargo Olivares, J. L. (2009). CAPÍTULO 6 : MODELOS DE PROPAGACIÓN.
- Cardama, A., Jofre, L., Rius, J., Romeo, R., & Blanch, S. (2000). Antenas, Alfaomega. Ediciones UPC, México.
- Castán, Y. (2006). Metodo Cientifico y Sus Etapas. Instituto Aragonés De Ciencias De La Salud, 2, 1–6.
- Cespedez, J., & Fajardo, G. (2012). Ingeniería Del Espectro Radioeléctrico. Manual De Gestión Nacional Del Espectro Radioeléctrico, 260. [http://www.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Planeacion/poli-lineamientos-manuales/Manuales/ManualGestionEspectro/Titulo\\_II.pdf](http://www.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Planeacion/poli-lineamientos-manuales/Manuales/ManualGestionEspectro/Titulo_II.pdf)
- Cornejo, & Rebolledo. (2016). Estimación De Parámetros En Modelos No Lineales: Algoritmos Y Aplicaciones Estimation of Parameters in Nonlinear Models: Algorithms and Applications. Revista EIA, 13(25), 81–98. <https://doi.org/10.14508/reia.2016.13.25.81-98>
- Cui, M., Yang, K., Xu, X. L., Wang, S. D., & Gao, X. W. (2016). A modified Levenberg-Marquardt algorithm for simultaneous estimation of multi-parameters of boundary heat flux by solving transient nonlinear inverse heat conduction problems. International Journal of Heat and Mass Transfer, 97, 908–916. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.085>
- Erceg, V., Greenstein, L. J., Tjandra, S. Y., Parkoff, S. R., Gupta, A., Kulic, B., Julius, A. A., & Bianchi, R. (1999). Empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 17(7), 1205–1211. <https://doi.org/10.1109/49.778178>
- Espinoza. (2014). Metodología de investigación tecnológica. <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/1146/mit1.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/1148>
- Espinoza, E. (2018). La hipótesis en la investigación. Mendive, 16(January), 122–139.

- Flores-Ruiz, E., Miranda-Novales, M. G., & Villasís-Keever, M. Á. (2017). El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. *Estadística inferencial. Revista Alergia México*, 64(3), 364. <https://doi.org/10.29262/ram.v64i3.304>
- García, N. P., Herrera, J., Uzcategui, J. R., & Peña, J. B. (2012). Modelo de propagación en las ciudades de mérida (Venezuela) y Cúcuta (Colombia) para redes wlan, operando en 2.4 ghz, en ambientes exteriores. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 16(62).
- García Nelson, P., Jorge, H., José Rafael, U., & Peña José, B. (2012). Wlan propagation model in Mérida (Venezuela) and Cúcuta (Colombia) cities, operating at 2.4 ghz in exterior environments. In N°62 (Vol. 16).
- Gomez, G; Catellanos, D. (2016). Modelo metodológico para la coexistencia de las señales de TDT y LTE. In *Corporación Universitaria Remington Escuela* (Primera ed). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hari, K. V. S., Baum, D. S., Rustako, A. J., Roman, R. S., & Trinkwon, D. (2001). *Channel Models for Fixed Wireless Applications Background*.
- Haslett, C. (2008). *Essential of Radio wave propagation*.
- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2018). Metodología de la investigación. In *Metodología de la investigación*. <https://doi.org/-ISBN 978-92-75-32913-9>
- Hernando Rabanos, Jo. M. (2012). *Transmision\_por\_Radio,\_1°\_ED.\_Jose\_M.\_Hernando\_Rabanos.pdf*.
- Herrera, & Trujillo, C. (2019). Loss prediction model of a 850 MHz system using radio wave recommendations for terrestrial services. *Journal of Physics: Conference Series*, 1388(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1388/1/012045>
- Herrera, J. ; Villamizar, W. (2014). Ajuste y comprobación de un modelo experimental de radio propagación en ambientes exteriores semi urbanos para sistemas inalámbricos en la banda de frecuencia 2.4 Ghz. *Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada*, 2(24). [http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs\\_viceinves/index.php/RCTA/article/view/2338](http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RCTA/article/view/2338)
- Herrera, J. (2013). Predicción De Cobertura En Ambientes Semiurbanos Mediante Método Experimental Para Sistemas Inalámbricos En La Banda De Frecuencia 2.4 GHz. *Revista*

Colombiana De Tecnologías De Avanzada, 2(22).  
[http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_40/recursos/04\\_v19\\_24/revista\\_22/09012014/10.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/04_v19_24/revista_22/09012014/10.pdf)

Herrera, Medina, & Camargo. (2019). Loss estimation model for a mobile microcell based on a mobile application. *Espacios*, 40(37), 1–12.

Hurtado, J. (2012). Metodología de la Investigación Holística. In Caracas.  
<https://metodologiaecs.files.wordpress.com/2015/09/metodologia-de-investigacion-holistica-3ra-ed-2000-jacqueline-hurtado-de-barrera-666p.pdf>

International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation. (2019). Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz P Series Radiowave propagation: Vol. P Series R.

International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation P.1144-10. (2019). Guide to the application of the propagation methods of Radiocommunication Study Group 3. 10,(Geneva, Switzerland). <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1144/en>

International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation P.1546-5. (2013). Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz Serie P. <Http://Www.Itu.Int/Publ/R-REC/Es>, 5.

International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation P.530-17. (2017). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. 13,(Geneva, Switzerland).

International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation SM.378-7. (2018). ITU-R SM.378-7 Field-strength measurements at monitoring stations. 2–4.

International Telecommunication Union (ITU): ITU-R Recommendation SM 2256-1. (2016). Medición y evaluación de la ocupación del espectro Serie SM.2256-1. 1.

Juárez, & Velazquez, M. (2013). Análisis de propagación con los modelos del espacio libre y Hata a la frecuencia de 915 mhz en la unidad profesional Adolfo López Mateos. In INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

- Kim, S.-C., Guarino, B. J., Willis Iii, T. M., Erceg, V., Fortune, S. J., Valenzuela, R. A., Thomas, L. W., Ling, J., & Moore, J. D. (1999). Radio Propagation Measurements and Prediction Using Three-Dimensional Ray Tracing in Urban Environments at 908 MHz and 1.9 GHz. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, 48(3).
- Kumar, P., Patil, B., & Ram, S. (2015). Selection of Radio Propagation Model for Long Term Evolution ( LTE ) Network. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(1), 373–379. [www.ijergs.org](http://www.ijergs.org)
- Kwang-Cheng, Chen and Ramjee, P. (2009). *Cognitive Radio Networks* (John Wiley & Sons Ltd (Ed.); Third). Wiley.
- Landre, J., & Rawas, Z. El. (2013). LTE performance assessment. 2866–2870.
- Lotsberg, L., & Thomsen, T. (1998). Fatigue of Ship Shaped Production and Storage Units. *Offshore Technology Conference*. <https://doi.org/10.4043/8775-MS>
- Manual. (2011). Manual Comprobación Técnica del Espectro. In Manual (Vol. 1). [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-21-2015-PDF-S.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-21-2015-PDF-S.pdf)
- Marion, E., & Esquivel, K. (2006). Software de An ´ alisis de Propagaci ´ on Outdoor.
- Ministerio de las TIC. (2016). Manual de operación del SGE. 1(1), P.38.
- Mousalli-Kayat, G. (2015). Métodos y Diseños de Investigación Cuantitativa. Mérida, June, 39. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2633.9446>
- Oriol Sallent Roig, José Luis Valenzuela González, R. A. C. (2003). Principios de comunicaciones móviles.
- Parsons, J. D. (2000). The Mobile Radio Propagation Channel Second Edition Emeritus Professor of Electrical Engineering. In *Electrical Engineering*.
- Peck, R., Olsen, C., Devore, J., & Sovak, M. M. (2016). Minitab ® Technology Manual to Accompany Introduction to Statistics & Data Analysis FIFTH EDITION Prepared by.
- Perez, G. (2015). Instituto politécnico nacional. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10029/71.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Qaraqe, K. A., Yarkan, S., Güzelgöz, S., & Arslan, H. (2013). Statistical wireless channel propagation characteristics in underground mines at 900 MHz: A comparative analysis with indoor channels. *Ad Hoc Networks*, 11(4), 1472–1483. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2011.01.015>
- Rancy, F. (2015). Manual sobre la Gestión nacional del espectro. 358.
- Rappaport, T. S. (2002a). *Wireless Communications, Principles and Practice*.
- Rappaport, T. S. (2002b). *Wireless Communications Principles and practice* (P. Hall (Ed.)). Prentice Hall.
- Rappaport, T. S., & Sandhu, S. (2002). Radio wave propagation for emerging wireless personal communication systems. In *Wireless Personal Communications* (pp. 1–27). Springer.
- Recommendation P-1406-2 ITU-R. (2015). RECOMMENDATION P.1406-2 Propagation effects relating to terrestrial land mobile and broadcasting services in the VHF and UHF bands. Electronic Publication, P-series. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1406-2-201507-I/en>
- Recommendation SM.378-7. (2018). Field-strength measurements at monitoring stations Annex 1. 1–3.
- Restrepo Angulo, A. (2010). *Compendio de telecomunicaciones 3. Conceptos básicos de ingeniería de Radiopropagación (Primera)*. Universidad de Medellín.
- Rubinstein, T. N. (2002). Manual Propagación de las ondas radioeléctricas en sistemas terrenales móviles terrestres en las bandas de ondas métricas y decimétricas. 122. <http://www.itu.int/ITU-R>.
- Sati, Govind; Singh, S. (2014). A review on outdoor propagation models in radio communication. *International Journal of Computer Engineering & Science*, 4(2), 64–68.
- Saunders, S., & Aragon, A. (2018). Antennas and propagation for wireless communications systems. <https://doi.org/10.1109/telsks.2017.8246233>
- Schipper, M. (2017). Análisis eficiente de la cobertura de redes de radiodifusión terrestre. *Novedades*, 32–34. [https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_news\\_from\\_rs/205/NEWS\\_205\\_spanish\\_BCDRIVE.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_news_from_rs/205/NEWS_205_spanish_BCDRIVE.pdf)



- Soto, C. (2010). Optimización estocástica aplicada al emplazamiento de estaciones base en comunicaciones móviles celulares. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/209/1/184801.pdf>
- Stüber, G. L. (2017). Principles of mobile communication: Fourth edition. In Principles of Mobile Communication: Fourth Edition. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-55615-4>
- telecomHall ES. (2013). Usando a G-MoN (WarDriving - Drive Test - Site Survey) para Wi-Fi 2G 3G UMTS 4G LTE - telecomHall ES. <http://www.telecomhall.com/ES/usando-a-g-mon-wardriving-drive-test-site-survey-para-wi-fi-2g-3g-umts-4g-lte.aspx>
- Teng, J., Jia, Y., & Li, Y. (2019). Scenario-Oriented Calibration of the Radio Propagation Models in TD-LTE Power Wireless Private Networks. Proceedings of the IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences, ICSESS, 2018-Novem, 597–601. <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2018.8663816>
- Tuan, S.-C., Chen, J.-C., Chou, H.-T., & Chou, H.-H. (2003). Optimization of propagation models for the radio performance evaluation of wireless local area network. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003. IEEE, 2, 146–149.
- Vera Rivera, Á., Núñez Unda, A., Ramos, B., Macías, E., Suárez, Á., & Gómez, J. (2015). Lee Microcell Propagation Model: A Complex Case Empirical Study. 14(1), 33–42.
- Walfisch, J., & Bertoni, H. L. (1988). A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 36(12), 1788–1796. <https://doi.org/10.1109/8.14401>
- Yin, X., & Cheng, X. (2016). Channel Estimation and Modelling for Wireless Communications Propagation Channel Estimation and Modelling for.

## SOBRE EL AUTOR



El ingeniero Jorge Enrique Herrera Rubio es egresado de la Universidad de Pamplona, en donde obtuvo el título de Ingeniero electrónico. Es Especialista en telecomunicaciones de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia. Terminó sus estudios con el título de Magister en Electrónica de la Universidad Experimental del Táchira, Venezuela. Doctor en Ciencias, de la Universidad Beloso Chacín- URBE- Maracaibo-Venezuela.

Entre otros estudios que ha realizado se destacan:

Especialización en interventoría de proyectos de telecomunicaciones, Servicio Nacional de Aprendizaje Bogotá.

Diplomado en pedagogía basada en competencias, Medellín.

Diplomado en contratación estatal y contencioso administrativo, UNAD.

Diplomado en Gerencia y gestión educativa, Universidad Libre, Cúcuta.

Diplomado en sistemas Integrados de Calidad HSEQ, Universidad Libre.

Diplomado en redes de computadores-Proyecto inteligente, Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB—ITEMS, Bucaramanga.

DAC (D-Link Advanced Certification) for Wireless, D-link Latino America Bogotá.

*Jorge Enrique Herrera Rubio*

Diplomado en docencia y didáctica universitaria, Universidad Francisco de Paula Santander.

Cisco Certified Network Associated – CCNA, Cisco Systems, Bucaramanga

Técnico Profesional en Telecomunicaciones, Instituto Tecnológico y Telecomunicaciones (ITEC) - Bogotá D.C.

Además de sus conocimientos académicos, ha tenido una amplia experiencia en el área de ingeniería electrónica, redes y telecomunicaciones por más de 19 años, como ingeniero de soporte en Telecom Colombia, Telecom en liquidación, Colombia. Gerente de TIC en Wnetworks. Gerente de proyectos en Redes digitales, Venezuela.

Ingeniero de proyectos Consistelco Ltda., Bogotá. Director del proyecto de ampliación, montaje e implementación de la red de datos e inalámbrica, JJ Pita y Cía. S.A, Cúcuta.

Ingeniero de soporte de backbone Hospital Erasmo Meoz, Cúcuta. Director y coordinador del plan de expansión de la red de conectividad inalámbrica de BERU internet Ltda., Arauca.

Por otra parte, tiene experiencia académica de 21 años como docente en las áreas de: las redes convergentes, telecomunicaciones, electrónica de telecomunicaciones, telemática, sistemas inalámbricos, entre otras, tanto a nivel de pregrado como de postgrado.

Es director del semillero de investigación REDCOMSIS y del grupo de investigación GITENT del programa de Ingeniero en telecomunicaciones en la Universidad e Pamplona.

Ha laborado como docente catedrático, medio tiempo y tiempo completo en las universidades: UFPS, Libre, FESC, Simón Bolívar, UNET, Cooperativa de Colombia y Universidad de Pamplona.

Docente invitado en apoyo académico y capacitador en las empresas: Conasegur, ETB, Cooperativa de Colombia.

También ha sido asesor y consultor de un gran número de empresas de la región entre ellas: Jardines la Esperanza, Foto internacional, Clínica Jericó, Progreseemos Cúcuta y otras más.



Formando **líderes** para la  
construcción de un nuevo  
**país en paz**