

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE MAESTRÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA EL ENLACE
DESCENDENTE EN REDES HSPA+ EN ÁREAS URBANAS Y SUBURBANAS.
CASO ESTUDIO: BARRANQUILLA**

INGENIERO ALEXIS BARRIOS ULLOA

**Trabajo de grado para optar al título de
Magister en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Eléctrica y Electrónica**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA MAESTRÍA EN INGENIERÍA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.
2015**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA EL ENLACE
DESCENDENTE EN REDES HSPA+ EN ÁREAS URBANAS Y SUB-URBANAS.
CASO ESTUDIO: BARRANQUILLA**

INGENIERO ALEXIS BARRIOS ULLOA

Director:
Ingeniero Ricardo Arjona Angarita (MSc)

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA MAESTRÍA EN INGENIERÍA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.
2015

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Cartagena de Indias D.T. y C., Abril 30 de 2015

Cartagena de Indias D.T. y C., Abril XX de 2015

Señores:

**COMITÉ EVALUADOR DE MAESTRIA
PROGRAMA DE MAESTRIA EN INGENIERÍA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

Entrego para su evaluación y consideración del primer avance del trabajo de tesis titulado “**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA EL ENLACE DESCENDENTE EN REDES HSPA+ EN ÁREAS URBANAS Y SUB-URBANAS. CASO ESTUDIO: BARRANQUILLA**”. Como requisito para optar por el título de Magister en Ingeniería con Énfasis en Industrial.

Cordialmente,

ALEXIS BARRIOS ULLOA

Cartagena De indias D.T. y C., Abril 30 de 2015

Señores:

**COMITÉ EVALUADOR DE MAESTRIA
PROGRAMA DE MAESTRIA EN INGENIERÍA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

Estimados Señores

Con respeto me dirijo a ustedes para comunicarles que he dirigido el presente trabajo de tesis titulado **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA EL ENLACE DESCENDENTE EN REDES HSPA+ EN ÁREAS URBANAS Y SUB-URBANAS. CASO ESTUDIO: BARRANQUILLA”**. Lo anterior es con el fin de hacer entrega del primer avance formal del mismo para que sea sometido a su respectiva evaluación.

Cordialmente

Ing. Ricardo Arjona Angarita
Magister en Ingeniería Electrónica
Director del Proyecto

*En primer lugar a **Dios**, por haberme guiado en todo mi desarrollo profesional, por darme fortaleza en momentos difíciles y por brindarme todo lo necesario para lograr mis metas.*

*A mi **familia** por todo el apoyo que me dieron a lo largo de este proceso de maestría y por la paciencia que me tuvieron.*

*A mis **amigos** que siempre estuvieron dándome ánimo y no me dejaron desistir.*

*Al **Ingeniero Jairo Salcedo**, por su guía y ayuda en los procesos estadísticos*

*Al **Ingeniero Jesús Campero Coronado**, porque sin su ayuda con el equipo para las mediciones, esto no habría sido posible*

*A mis **profesores** por todas sus ayudas y recomendaciones*

*A mi **Director, Ingeniero Ricardo Arjona**, por su ayuda y porque nunca dejo de atenderme, incluso más allá de lo que su deber le obligaba.*

*Al **Ingeniero José Luis Villa**, quien siempre tuvo tiempo para atender mis solicitudes y para darme ayuda en todo este proceso*

Tabla de contenido

CAPÍTULO I	1
DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. General.....	4
1.2.2. Específicos	4
1.3. Resumen.....	5
CAPÍTULO II	7
CONTEXTO Y MOTIVACIÓN	7
2.1. Descripción del problema.....	11
2.2. Formulación del problema.....	18
2.3. Alcances y limitaciones	19
2.3.1. Alcances.....	19
2.3.2. Limitaciones.....	19
2.4. Marco teórico	20
2.4.1. HSPA+.....	20
2.4.2. Propagación	25
2.4.3. Enlace de radio comunicación.....	25
2.4.4. Mecanismos básicos de propagación.....	27
2.4.5. Path Loss	30
2.4.6. Tipos de desvanecimiento.....	30
2.5. Modelos empíricos para cálculo de pérdidas por trayectoria	32
2.5.1. Análisis de modelos de propagación empíricos	34
CAPÍTULO III	51
METODOLOGÍA	51
3.1. Marco Contextual.....	55
3.2. Selección de los modelos para la investigación.....	56
3.2.1. Zonas urbanas y suburbanas	56
3.3. Velocidad de los móviles.....	60

3.4.	Sistema de medición.....	61
3.5.	Tipos de celdas.....	62
3.6.	Altura de la antena del receptor.....	66
3.7.	Parámetros de los modelos empleados.....	68
3.8.	Análisis comparativo de los modelos y ajuste del modelo.....	70
CAPÍTULO IV.....		73
ANÁLISIS COMPARATIVO Y.....		73
AJUSTE DEL MODELO.....		73
4.1.	Análisis de modelos.....	74
4.2.	Análisis en el ambiente suburbano.....	76
4.3.	Análisis en el ambiente urbano.....	84
4.4.	Ajuste del modelo para cada escenario.....	91
4.4.1.	Ajuste del modelo Interino de la Universidad de Stanford para el ambiente suburbano.....	91
4.4.2.	Ajuste del modelo Interino de la Universidad de Stanford para el ambiente urbano.....	98
Conclusiones.....		102

Lista de tablas

		Pag.
Tabla 1	Valores de a, b y c para diferentes categorías de terreno en el modelo SUI.....	38
Tabla 2	Entornos de funcionamiento físico – Degradaciones de la propagación.....	57
Tabla 3	Entornos de funcionamiento físico – Velocidad típica del móvil.....	60
Tabla 4	Definición de tipos de celdas.....	63
Tabla 5	Radiobases del ambiente suburbano.....	64
Tabla 6	Radiobases del ambiente urbano.....	65
Tabla 7	Esquema de medición para la investigación.....	67
Tabla 8	Rango de validez de los modelos para la investigación.....	74
Tabla 9	Resumen estadístico para pérdidas medidas en el ambiente suburbano.....	76
Tabla 10	Resumen estadístico para cálculos con el modelo COST HATA en el ambiente suburbano.....	76

Tabla 11	Resumen estadístico para cálculos con el modelo Walfisch Ikegami en el ambiente suburbano.....	77
Tabla 12	Resumen estadístico para cálculos con el modelo SUI tipo A en el ambiente suburbano.....	77
Tabla 13	Resumen estadístico para cálculos con el modelo SUI tipo B en el ambiente suburbano.....	77
Tabla 14	Resumen estadístico para cálculos con el modelo SUI tipo C en el ambiente suburbano.....	
Tabla 15	Resultado de la prueba de Kruskal-Wallis para mediciones y simulaciones en el ambiente suburbano.....	82
Tabla 16	Resumen estadístico para pérdidas medidas en el ambiente urbano.....	84
Tabla 17	Resumen estadístico para cálculos con el modelo COST-HATA en el ambiente urbano.....	84
Tabla 18	Resumen estadístico para cálculos con el modelo Walfisch Ikegami en el ambiente urbano.....	85
Tabla 19	Resumen estadístico para cálculos con el modelo SUI tipo A en el ambiente urbano.....	85
Tabla 20	Resumen estadístico para cálculos con el modelo SUI tipo B en el ambiente urbano.....	85
Tabla 21	Resumen estadístico para cálculos con el modelo SUI tipo C en el ambiente urbano.....	86
Tabla 22	Análisis de varianza para el modelo ajustado del ambiente suburbano.....	95
Tabla 23	Valores estadísticos para el error en el ambiente suburbano.....	95
Tabla 24	Análisis de varianza para el modelo ajustado del ambiente urbano..	100
Tabla 25	Valores estadísticos para el error en el ambiente urbano.....	101
Tabla 26	Resumen de resultados para el ambiente sub-urbano.....	123
Tabla 27	Resumen de resultados para el ambiente urbano.....	129

Lista de figuras

Figura 1	Número de suscripciones de servicios móviles a nivel mundial.....	Pag. 7
Figura 2	Número de suscripciones en diferentes tecnologías inalámbricas a nivel mundial.....	8
Figura 3	Total de suscriptores de internet fijo en Colombia.....	9
Figura 4	Total Internet móvil en Colombia.....	10
Figura 5	Aumento de las tasas de transmisión del estándar HSPA+ entre los años 2013 a 2018.....	23
Figura 6	Porcentaje de uso de 16 QAM durante pruebas realizadas por el 3GPP en un cluster urbano y un cluster suburbano.....	25
Figura 7	Esquema de un enlace inalámbrico de comunicaciones.....	26

Figura 8	Reflexión y refracción: onda incidente sobre un plano.....	28
Figura 9	Difracción Knife-edge.....	29
Figura 10	Árbol de modelos de propagación. Recategorización propuesta por Phillips.....	33
Figura 11	Parámetros del modelo Walfisch Ikegami.....	40
Figura 12	Ángulo incidente entre la estación base y el móvil.....	42
Figura 13	Proceso metodológico de la investigación.....	53
Figura 14	Ruta para mediciones de potencia en el ambiente urbano.....	58
Figura 15	Ruta para mediciones de potencia en el ambiente suburbano.....	59
Figura 16	Metodología utilizada para obtener la ecuación del modelo ajustado para el caso estudio.....	70
Figura 17	Probabilidad normal para pérdidas medidas en el ambiente suburbano.....	79
Figura 18	Gráfico de probabilidad normal para modelo COST HATA en el ambiente suburbano.....	79
Figura 19	Gráfico de probabilidad normal para modelo Walfisch Ikegami en el ambiente suburbano.....	80
Figura 20	Gráfico de probabilidad normal para modelo SUI tipo A en el ambiente suburbano.....	80
Figura 21	Gráfico de probabilidad normal para modelo SUI tipo B en el ambiente suburbano.....	81
Figura 22	Gráfico de probabilidad normal para modelo SUI tipo C en el ambiente suburbano.....	81
Figura 23	Comparación des medias de cada uno de los modelos y de las mediciones en el ambiente suburbano	83
Figura 24	Gráfico de probabilidad normal para pérdidas calculadas en el ambiente urbano.....	86
Figura 25	Gráfico de probabilidad normal para modelo COST-HATA en el ambiente urbano.....	87
Figura 26	Gráfico de probabilidad normal para modelo Walfisch-Ikegami en el ambiente urbano.....	87
Figura 27	Gráfico de probabilidad normal para modelo SUI tipo A en el ambiente urbano.....	88
Figura 28	Gráfico de probabilidad normal para modelo SUI tipo B en el ambiente urbano.....	88
Figura 29	Gráfico de probabilidad normal para modelo SUI tipo C en el ambiente urbano.....	89
Figura 30	Comparación de medias de cada uno de los modelos y de las mediciones en el ambiente urbano.....	90
Figura 31	Mediciones vs modelo ajustado en el ambiente suburbano.....	93
Figura 32	Pérdidas modelo ajustado con respecto al exponente de pérdidas por trayectoria en el ambiente sub-urbano.....	94
Figura 33	Imagen satelital sector Batallón de Policía Militar en la vía 40 de Barranquilla.....	95
Figura 34	Comparación de medias en entre mediciones y modelos para el sector del Batallón de Policía Militar.....	97
Figura 35	Mediciones vs modelo ajustado en el ambiente urbano.....	99
Figura 36	Pérdidas modelo ajustado con respecto al exponente de pérdidas por	100

	trayectoria en el ambiente urbano.....	
Figura 37	Ejemplos de cambio de altura de edificaciones en una misma hilera para el ambiente urbano.....	109
Figura 38	Hoja de datos de la antena del transmisor.....	111
Figura 39	Ubicación de las estaciones bases en cada escenario.....	
Figura 40	Pérdidas calculadas vs pérdidas para cada modelo en el ambiente sub-urbano.....	116
Figura 41	Pérdidas calculadas vs pérdidas para cada modelo en el ambiente urbano..	116

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

1.1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de propagación estiman o predicen el comportamiento de una señal en un ambiente específico y tradicionalmente se han centrado en la predicción de la intensidad de la señal a una cierta distancia del transmisor, así como la forma su variación en la proximidad espacial de un lugar determinado.

Los principales usos de los modelos de propagación son entre otros: la estimación del área del radio de cobertura de un transmisor, planeación de las redes de los operadores que prestan servicios de radio, estimar la atenuación y pérdidas por trayectoria. Para concebir estos modelos, se encontró una correlación entre la intensidad de la señal recibida y otros parámetros tales como alturas de antena y perfiles del terreno, a través de la utilización de la medición extensa y análisis estadístico.

Las redes de los operadores móviles están en constante cambio debido al crecimiento en el número de abonados, restricciones de tipo urbanístico (planes de ordenamiento territorial) y variaciones arquitectónicas. Lo anterior implica modificaciones en la ubicación de nuevas y antiguas radiobases para cubrir los servicios de comunicación móviles inalámbricos.

Si bien es cierto que las compañías de servicios móviles de comunicaciones realizan sus propios estudios de propagación, sus resultados no son dados a conocer al público en general; lo que implica que no puedan ser usados por la comunidad científica para investigaciones relacionadas y tampoco por operadores que ingresan al mercado. Lo anterior obliga a realizar estudios cada vez que se desea instalar o modificar estaciones bases para servicios móviles de comunicación distintos a los ofrecidos por las empresas de telefonía móvil.

Como objetivo general para solucionar en parte este problema, se llevó a cabo un estudio donde se compararon tres modelos de propagación empíricos: Interino de la Universidad de Stanford (SUI), Walfisch Ikegami y Cost 231-Hata; a fin de determinar el modelo más preciso con base en el nivel de predicción más alto para dos zonas específicas de la ciudad de Barranquilla. Existen muchos y diversos modelos para calcular las pérdidas por trayectoria desde un transmisor y receptor, así que para la selección se tuvieron en cuenta factores como frecuencia, altura de los transmisores y receptores, tipo de ambiente y otros.

Las zonas escogidas para la toma de muestras presentan características diferentes en términos de densidad poblacional. En primer lugar, la zona uno corresponde a un ambiente urbano ubicado en un sector comercial y bancario con alta densidad de edificaciones; y la segunda zona a un ambiente sub-urbano ubicado en un sector industrial con promedio de altura de edificaciones menor a la altura de las radio bases que cubren el sector.

Los resultados demostraron que los modelos de propagación seleccionados presentaban diferencias significativas con respecto a las medidas que se obtuvieron en campo, por lo cual se realizó un proceso de ajuste por regresión que condujo a un modelo para cada uno de los ambientes que fueron objeto del estudio.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. General

Evaluar el funcionamiento de los modelos de propagación aplicables al enlace descendente para redes HSPA+ en entornos urbanos y sub-urbanos y que permita seleccionar el modelo más apropiado, e identificar los factores que afectan la precisión de la estimación de potencia y realizar el ajuste respectivo para mejorar el desempeño del modelo seleccionado.

1.2.2. Específicos

- Establecer el estado del arte de los modelos de propagación empíricos más usados en la planeación y diseño de redes celulares que permita seleccionar los modelos a evaluar en el entorno urbano y sub-urbano de acuerdo con sus rendimientos.
- Realizar la evaluación comparativa –mediante técnicas estadísticas- de los modelos de propagación seleccionados en los entornos urbanos y sub-urbanos escogidos con cobertura de red HSPA+, que determine el rendimiento de cada modelo en términos de precisión en la estimación, a partir de mediciones de campo y de los cálculos de cada modelo obtenidos teóricamente.
- Seleccionar el modelo de propagación con mejor rendimiento e identificar los factores que afectan la estimación de este modelo en los sitios de prueba, y proponer ajustes que mejoren su funcionamiento y validar los mismos.

1.3. RESUMEN

Barranquilla es uno de los centros urbanos más importantes de Colombia y de mayor crecimiento. Su vocación portuaria, industrial y empresarial; sumado a su estratégica posición en el caribe le permiten ser uno de los polos de desarrollo más importante en los próximos años. Lo anterior ocasiona un crecimiento en la mayor parte de los sectores económicos, siendo las telecomunicaciones uno de los más influyentes.

Tal como lo demuestran las estadísticas que serán presentadas en la siguiente sección, existe un auge de las conexiones a Internet ya sea a través de computadores, tablets o teléfonos móviles; donde los operadores –especialmente móviles- se ven forzados a ampliar su cobertura y capacidad, lo cual implica un manejo eficiente de sus redes. Es así, como los estudios de propagación en sistemas inalámbricos se utilizan para determinar las pérdidas entre transmisor y receptor, lo que constituye una herramienta a la planeación y montaje de la infraestructura de los operadores.

El siguiente documento presenta un análisis (para el caso estudio en la ciudad de Barranquilla) de algunos de los modelos de propagación empíricos más usados para determinar las pérdidas en distintos escenarios a nivel mundial, y se plantea el ajuste de un modelo que describa de manera más precisa, el comportamiento de las mediciones obtenidas para el escenario seleccionado.

El primer capítulo presenta la descripción del problema y la justificación para llevar a cabo esta investigación. Los capítulos presentan el marco teórico el marco teórico, el

estado del arte de análisis de modelos de propagación y la metodología desarrollada para el cumplimiento de los objetivos. Por último, el cuarto capítulo presenta todo el análisis, los procedimientos y resultados estadísticos, así como el proceso de ajuste para obtener el modelo de propagación que describe de forma más adecuada, las pérdidas por trayectoria en los escenarios urbano y suburbano de la ciudad de Barranquilla.

CAPÍTULO II

CONTEXTO Y MOTIVACIÓN

La telefonía móvil para servicios de voz y datos tiene un crecimiento importante año a año. De acuerdo al reporte de movilidad de noviembre de 2014 de Ericsson (ver figura 1, el número de suscripciones móviles (incluyendo todas las tecnologías existentes) es de 7.100 millones y los pronósticos indican que esta cifra puede elevarse a 9.500 millones para el año 2020 (Ericsson, 2014a).

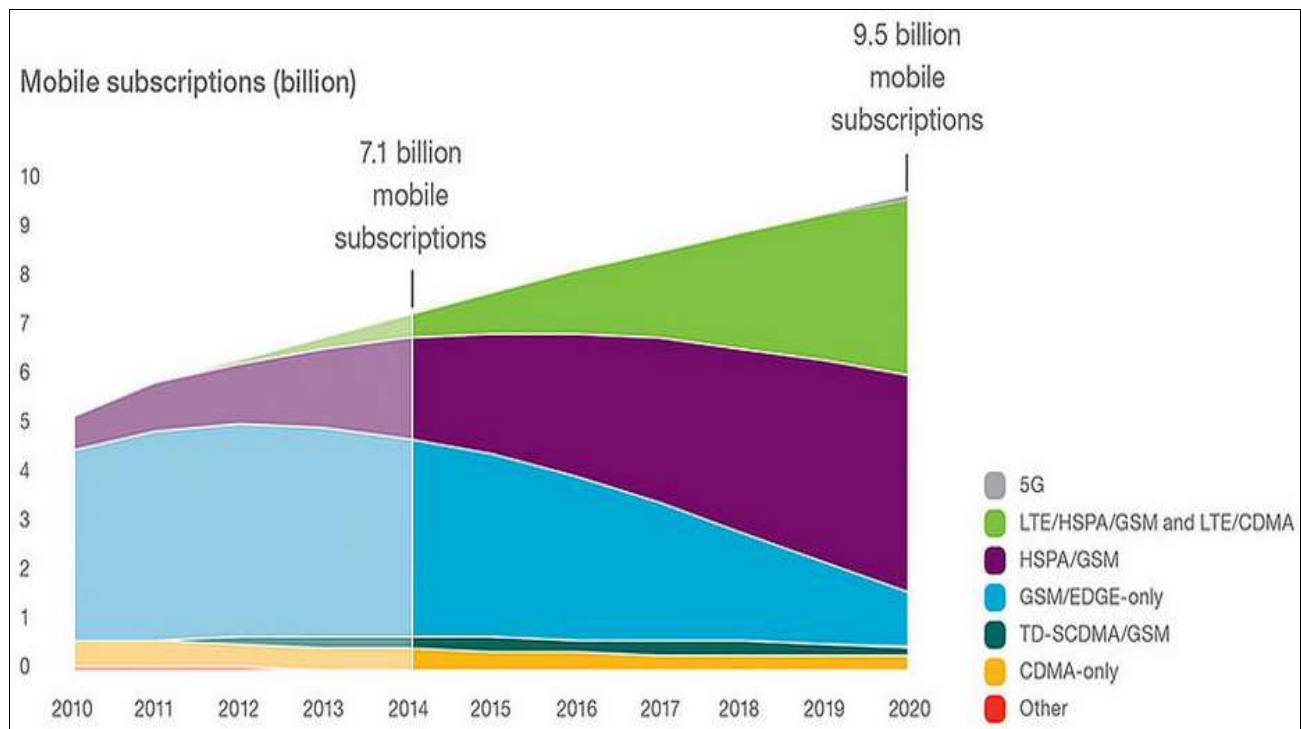


Figura 1. Número de suscripciones de servicios móviles a nivel mundial. Fuente: Ericsson.

El reporte también muestra que la tecnología móvil que dominará el mercado en los próximos años es LTE-A, sobre todo si se tiene en cuenta que los servicios de datos priman sobre los servicios de voz; a diferencia de lo que ocurría años atrás. Sin embargo HSPA+ sigue posicionado como un estándar ampliamente usado por los operadores móviles a nivel mundial.

El mismo reporte de Ericsson muestra que en el año 2014 el número de suscripciones en dispositivos que usan HSPA superó los 6.000 millones y aunque se muestra un descenso importante en los próximos años, seguirá posicionado como un estándar de amplio uso para los operadores y para otro tipo de aplicaciones como redes de sensores inalámbricas (Ericsson, 2014b)

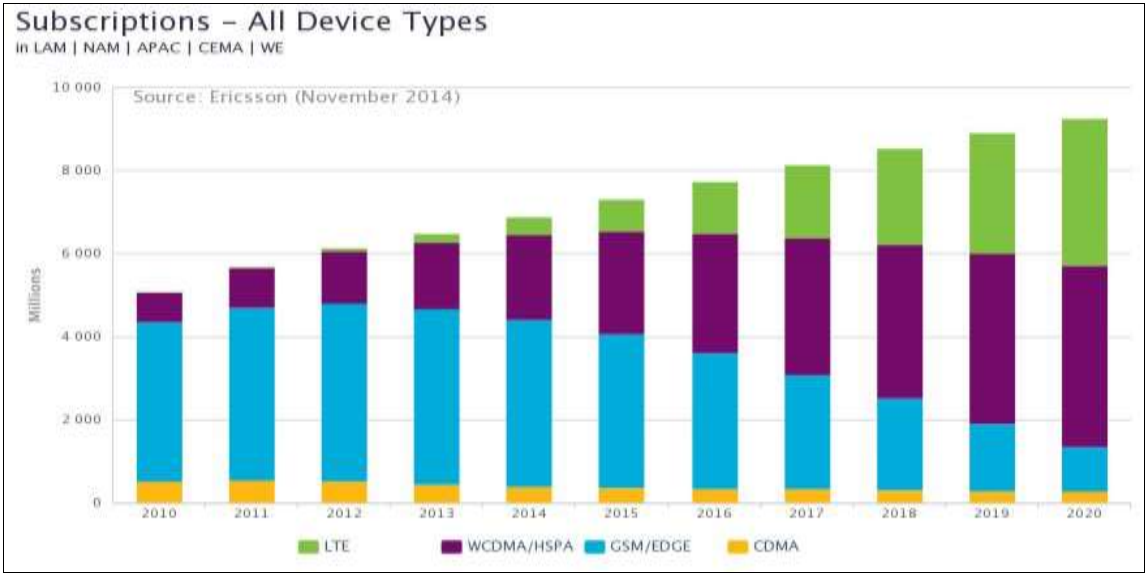


Figura 2. Número de suscripciones en diferentes tecnologías inalámbricas a nivel mundial. Fuente: Ericsson

Los datos de las figuras 1 y 2 demuestran que los servicios móviles (voz y datos) son cada vez más importantes, en detrimento de los servicios fijos. De igual forma el informe sectorial del Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones del año 2014 (MinTIC, 2014a), muestra que el número de conexiones a internet a través de redes fijas tuvo un aumento menor al 1% tal como se muestra en la figura 3.

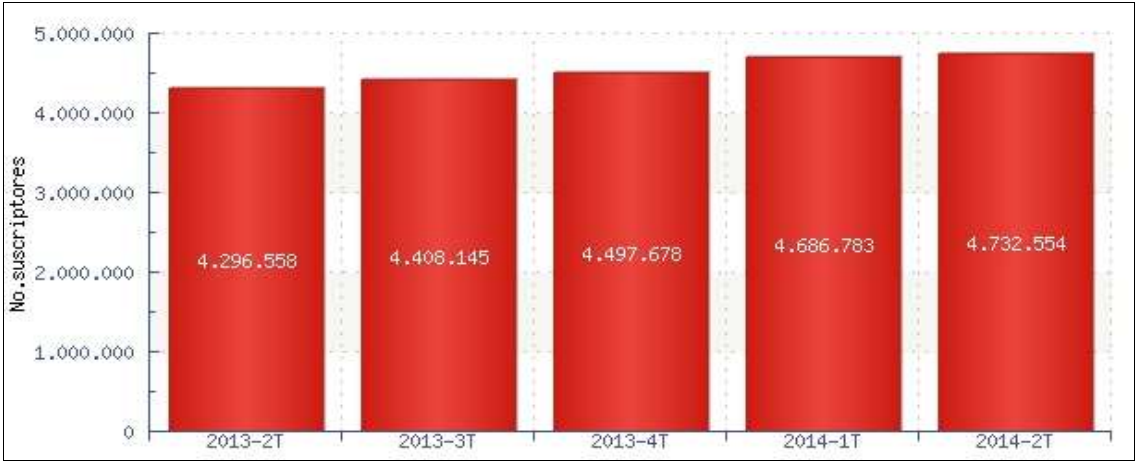


Figura 3: Total de suscriptores de internet fijo en Colombia. Fuente: MINTIC Colombia.

Mientras que el número de suscripciones de internet móvil en Colombia superó por primera vez a las conexiones fijas en 2014 tal como se muestra en la figura 4 (MinTIC, 2014b). Adicionalmente el informe del Ministerio demuestra que la demanda del servicio es mucho mayor a lo ofrecido, lo cual permite pronosticar que el despliegue de redes para servicios móviles en los próximos años será considerablemente importante a fin de aumentar la oferta.

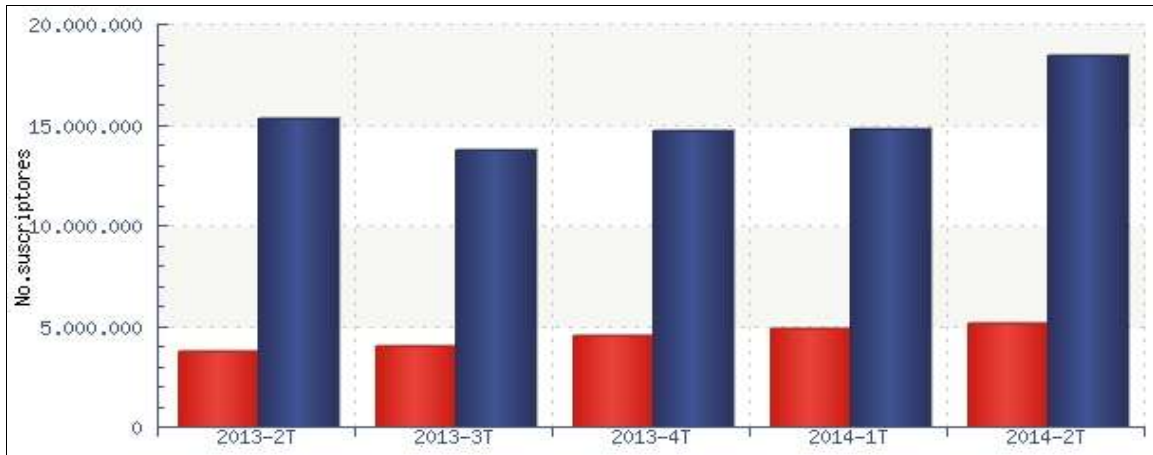


Figura 4: Total internet móvil en Colombia. Fuente: MinTIC Colombia.

Las estadísticas anteriores sumadas a un creciente número de suscriptores, necesidades de descarga mayores y requerimiento de mayores velocidades; implican necesariamente que en los próximos años se debe aumentar el número de radiobases que se deberán instalar para prestar un servicio óptimo de acuerdo a la demanda. Es allí donde los modelos de propagación entran a formar parte de la solución de esta problemática ya que el constante crecimiento de las ciudades, aumento en el número de construcciones y el desarrollo de servicios de comunicaciones inalámbricas; en la medida en que permitan una mejor planeación de la red y un mejor aprovechamiento de sus recursos de radio.

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En comunicaciones móviles los operadores de red enfrentan diversos problemas. Con respecto al diseño se podría decir que la ubicación de las estaciones bases y el comportamiento de la señal desde sus transmisores hasta los terminales, son algunos de los inconvenientes que se deben resolver para una buena puesta en funcionamiento de la red de acuerdo con los requerimientos mínimos de calidad establecidos en los estándares del 3GPP.

En Colombia las redes de telefonía móvil celular vienen funcionando desde mediados de la década de los noventa y desde esa época se vienen realizando estudios de propagación para el diseño de estos sistemas, pero sus resultados son poco conocidos debido a que forman parte de la información privada de las empresas del sector.

También es importante resaltar que los estándares y tecnologías evolucionan constantemente y en un principio los operadores con licencias para prestar servicios móviles celulares iniciaron con tecnologías análogas, y posteriormente evolucionaron a tecnologías digitales como TDMA, CDMA, GSM, HSPA, HSPA+ y LTE. Cada uno de ellos con diferencias entre sí, por lo cual el comportamiento de las señales en el medio y las pérdidas por trayectoria sufren cambios con respecto a los estudios iniciales.

Los organismos reguladores y los fabricantes buscan que las nuevas tecnologías de comunicación sean convergentes con sus predecesoras, a fin de evitar que los operadores tengan que realizar cuantiosas inversiones en nueva infraestructura para

sus redes. Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, los cambios en los estándares implican cambios en el comportamiento de los parámetros de la señal, sobre todo si estas se enfocan en transmisión de datos y no de voz.

Los operadores con mayor experiencia en el mercado colombiano, cuentan con herramientas computacionales y estudios de propagación previos que les permiten realizar un mejor diseño de su red y determinar la mejor ubicación para sus nuevas estaciones bases, así como estimar el comportamiento de la señal.

Los datos de las figuras 1, 2, 3 y 4 muestran claramente una tendencia por parte de los usuarios a conectarse a Internet a través de sus dispositivos móviles y con tecnologías que proporcionan una mayor velocidad de descarga como HSPA+ y LTE.

De este modo, a medida que aumenta el número de clientes, se hace necesaria la instalación de más radiobases para implementar un reuso de frecuencia adecuado y seguir manteniendo el aumento de cobertura. En Colombia, son conocidas las quejas por parte de los usuarios en lo que respecta a la continuidad de las llamadas y datos, sobre todo en las grandes ciudades. Uno de los factores que afecta la buena prestación del servicio es la problemática para instalar nuevas estaciones bases, sobre todo por las disposiciones urbanísticas de los planes de ordenamiento territorial.

También es sabido que algunas comunidades se organizan y evitan la instalación de torres con antenas debido a la errada creencia de que estas afectan la salud de las personas que viven cerca.

Un ejemplo de lo anteriormente expresado es la sentencia T-397/14 de la Corte Constitucional de Colombia en la que se aplica el principio de precaución y se ordena a un operador de telefonía móvil el desmonte de una antena en la ciudad de Bogotá, ya que aunque no hay certeza científica absoluta que concluya que existe afectación a las personas que se encuentren cerca de estaciones transmisoras de radio, si en el futuro se concretara ese riesgo, las consecuencias serían graves e irreversibles (Palacio, 2014).

Contrario a lo que se piensa, el aumento del número de radiobases reduce los niveles de exposición ya que al reducirse la distancia entre dos estaciones; más baja es la potencia de salida de cada antena. Todo lo anterior invita a realizar un diseño más estricto para la expansión de las redes actuales y para la instalación de nueva infraestructura (Ericsson, 2013), siendo la ubicación de las radiobases y sus parámetros, el principal desafío de diseño.

En este sentido, un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radio de un ambiente dado; y su desempeño es medido por la veracidad de los resultados en comparación con las mediciones de campo.

Por otra parte, la aplicabilidad de un modelo depende de varios factores como son: el tipo de terreno (montañoso, ondulado, liso), las características del ambiente de propagación (área urbana, suburbana, abierta), características de la atmósfera (índice de refracción, intensidad de las lluvias), propiedades eléctricas del suelo (conductividad terrestre), tipo del material de las construcciones urbanas entre otras (García-Alvarez & Rogriguez, 2002).

Theodore Rappaport, explica que “los modelos de propagación tradicionalmente se han centrado en la predicción de la intensidad de la señal a una cierta distancia del transmisor, así como la forma en la que esa misma señal varía en la proximidad espacial de un lugar determinado. Algunas de las utilidades de los modelos de propagación son: estimación del área del radio de cobertura de un transmisor, planeación de las redes de los operadores que prestan servicios de radio y también para estimar la atenuación y pérdidas por trayectoria. Para concebir estos modelos, se encontró una correlación entre la intensidad de la señal recibida y otros parámetros” (Rappaport, 2002).

Así, los estudios de propagación en sistemas inalámbricos se han venido desarrollando desde la década de los cuarenta del siglo XX (Phillips, Sicker, & Grunwald, 2013). Sin embargo el cambio constante de estándares, tecnologías y frecuencias de operación; obliga a una necesidad continua y creciente de nuevos estudios de manera que se pueda llevar la propagación hasta sus límites (Barclay, 1988). En 1988 Barclay plantea

la problemática de la compartición cada vez mayor del espectro radioeléctrico ante el aumento de servicios de comunicaciones inalámbricos.

En este sentido, un informe del área de investigaciones para la ciencia y la tecnología de la Comisión Europea también plantea que “el canal de propagación de radio es muy importante y un componente muy crítico para los sistemas de comunicaciones de radio móviles. Por lo tanto, el análisis detallado del canal de radio es de importancia básica para el diseño de futuros sistemas de comunicaciones móviles, así como para la optimización y la extensión de los sistemas existentes. Debido a la complejidad de los fenómenos de propagación y debido a la naturaleza estadística de los parámetros de canal de radio, una caracterización fiable del canal sólo puede basarse en mediciones apropiadas del canal”.(Directorate-General Information society: Telecommunications, Markets, 1999)

Con respecto a la situación presente, (Alonso-Quintana & Montejo-Sánchez, 2013) consideran que “el dimensionamiento de redes de comunicaciones inalámbricas es hoy en día una actividad que requiere de rapidez y efectividad dada la relevancia de las aplicaciones y servicios soportados por estas redes.

Con el fin de agilizar el proceso de diseño y realizarlos de una manera eficiente, son empleados los modelos predictivos de las pérdidas de trayecto; tópico de investigación abordado con énfasis, dada su aplicabilidad y versatilidad. Estos modelos representan una gran diversidad en cuanto a la exactitud, nivel de información geográfica y

topográfica requerida, costo computacional y el tipo de algoritmo que emplean para obtener las predicciones. Las mediciones experimentales resultan costosas en términos de tiempo y recursos en la medida que son mayores el área de cobertura y la precisión deseada, este hecho refuerza la amplia utilización y aceptación de estos modelos”.

(Chebil, Lwas, Islam, & Zyoud, 2011) plantean que los modelos de pérdida de trayecto de propagación empíricos son herramientas importantes para la investigación debido a su velocidad de ejecución y su dependencia limitada del conocimiento detallado del terreno. Los servicios móviles están aumentando rápidamente y por lo tanto se requiere un mejor diseño de redes de manera que se pueda brindar una mejor calidad de servicio a los receptores móviles.

Otros autores consideran que la importancia del análisis de modelos de propagación en entornos específicos radica en que sus resultados teóricos y su comparación con mediciones permite evaluar su correcta aplicación en función de sus limitaciones, el escenario y los requerimientos del sistema (Quintana, 2012).

La mayor parte de modelos de propagación empíricos usados en la actualidad fueron ideados inicialmente para ciudades o regiones específicas y posteriormente lo que se ha hecho es ajustarlos a escenarios con características similares. (Ardila, 2012) plantea que al existir diferencias de los centros urbanos latinoamericanos con respecto a ciudades europeas, japonesas y norteamericanas (para las cuales fueron desarrollados originalmente los modelos de propagación empíricos más reconocidos), se justifica la

realización de ajustes con el fin de aumentar sus niveles de predicción. Para ciudades de Colombia son pocos los resultados de estudios sobre la capacidad de predicción que esos modelos matemáticos ya establecidos tienen en nuestras locaciones y disponibles al público en general.

Todo lo anterior demuestra que es necesario el uso de modelos de propagación propios o ajustados que permitan un diseño de las nuevas redes de comunicación móvil de manera que se cumplan las reglamentaciones urbanísticas y sobre todo se pueda prestar un buen servicio a los usuarios finales.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Entre las múltiples interrogantes que pueden darse en el tema de los modelos de propagación para redes inalámbricas, surgieron dos relacionadas con el tema de investigación:

¿Cuál es el nivel de predicción de los modelos de propagación de redes HSPA+ en Barranquilla, Colombia?

Ya con un modelo definido como el “mejor”, ¿Es necesario ajustar este modelo de predicción para el caso en estudio?

2.3. ALCANCES Y LIMITACIONES

2.3.1. Alcances

Con la ejecución de este proyecto se podrá determinar, con base en mediciones y cálculos teóricos, cuál de los modelos de propagación empíricos estudiados y sin ajustar, presenta el nivel de predicción más alto al momento de determinar las pérdidas por trayectoria en el enlace descendente en una red de cuarta generación HSPA+ en un área urbana y otra suburbana de la ciudad de Barranquilla (Colombia) y que además permita hacer una mejora sobre ese modelo seleccionado como “el mejor” de manera que el porcentaje de efectividad aumente al reducir el error entre las mediciones realizadas en campo y los datos calculados teóricamente; de manera que se pueda aportar información importante para la instalación de sistemas inalámbricos en la zona geográfica seleccionada para el estudio sin requerir mediciones de campo.

2.3.2. Limitaciones

Las principales limitaciones en esta investigación giran en torno a los recursos de hardware necesarios para obtener las mediciones en el área de estudio, por lo cual se limitó a áreas geográficas que son reducidas en comparación al tamaño total de la ciudad donde se llevó a cabo el estudio; de manera que los costos pudieran ser asumidos por el estudiante que lleva a cabo la investigación. Otro factor que limita el proyecto es la poca información que existe acerca de las características arquitectónicas de las áreas en estudio en la ciudad de Barranquilla y de resultados de investigaciones similares llevadas a cabo en Colombia.

2.4. MARCO TEÓRICO

2.4.1. HSPA+

En lo que respecta a las tecnologías móviles de cuarta generación se han venido desarrollando tres estándares que permiten cubrir las necesidades previstas para este tipo de redes, las cuales son: Evolved High Speed Packet Acces(HSPA+), WiMax y Long Term Evolution (LTE). Aunque la tecnología LTE ofrece mejoras sustanciales sobre HSPA+, en Colombia y en muchos otros países, esta última todavía sigue siendo usada por los operadores y seguirá siendo una opción en los próximos años tal como lo demuestran las cifras de Ericsson (Ericsson, 2014b).

HSPA son un conjunto de tecnologías que permite a los operadores de tercera generación (3G y WCDMA) actualizar sus redes para funcionar a velocidades de banda ancha. HSPA incluye HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), HSUPA (High Speed Packet Access enlace ascendente) y HSPA +. Las redes que utilizan la tecnología HSPA+ presentan mayores capacidades y técnicas de modulación de mayor orden (64 QAM por ejemplo), lo cual le permite funcionar a velocidades superiores que los estándares que la antecedieron (GSMA, 2015).

Para el caso colombiano, los tres operadores más importantes implementaron la tecnología HSPA+ durante el año 2012 ya que la integración con las redes existentes era relativamente fácil y porque se podían ofrecer mayores velocidades con respecto a su antecesor HSPA. Es importante aclarar que la Unión Internacional de

Telecomunicaciones (UIT) reconoció en el 2012 a HSPA+ como una tecnología de cuarta generación 4G (ITU-R, 2013b). En esta sección se hace una breve descripción de la evolución del estándar HSPA+.

En 2005 algunos operadores consideraban que UMTS/HSPA podía tener un margen de mejora por lo cual trabajaron en el estándar, ya que no estaban convencidos de dar el salto hacia LTE a corto plazo. HSPA+ es una evolución de HSPA propuesta por 3G Américas en el año 2006.

En el momento de la presentación del plan para la evolución de HSPA ya habían comenzado los trabajos en el release 7 de 3GPP, sin embargo el 3G Américas consideró que esta actualización debía ser más rica en contenido para mejorar la capacidad y el rendimiento con respecto al release 5 y al release 6 y así poder acercarse a realizar lo pronosticado para LTE, de manera que se pudiera aumentar el tiempo de vida útil de UMTS. Dicha propuesta buscaba un efecto similar en UMTS a lo que la tecnología EDGE hizo por GPRS, lo que permitió alargar el tiempo vida de 2G (Tapia, Liu, Karimli, & Feuerstein, 2009).

El release 7 se centró en características que permitieran el desarrollo de servicios convergentes como VoIP, push to talk o video llamadas. Entre los años 2006 y 2007 se lograron avances importantes en el desarrollo de la norma UMTS y algunas de las características de HSPA+ fueron introducidas en el release 7, mientras que otras se encuentran estandarizadas bajo el release 8 (Tapia et al., 2009).

HSPA+ incluye mejoras a la interfaz de radio de HSPA tales como modulaciones de orden superior y soporte de portadora dual. También se acerca al concepto de arquitectura previsto para LTE y WIMAX (Tapia et al., 2009)

El release 9 incluyó operaciones de doble portadora en el enlace descendente en combinación con operación MIMO, HSDPA de doble banda, operación HSPA de doble portadora en el enlace ascendente, soporte de femtoceldas, soporte para funciones regulatorias como posicionamiento del equipo de usuario en emergencia y sistema de alertas comerciales.

En cuanto a HSPA el release 10 incluyó operación de cuatro portadoras y opciones MIMO adicionales. También incluyó optimizaciones a femtoceldas, optimizaciones para comunicaciones M2M y descarga local de tráfico IP. Por último, el release 11 provee ocho portadoras para HSPA en el enlace descendente, optimizaciones en el enlace ascendente para mejorar la latencia, 64 QAM en el enlace ascendente, transmisión multipunto en el enlace descendente y agregación de portadoras HSDPA no contiguas (4G Americas, 2013).

De acuerdo a 4G Américas, la continua evolución del estándar HSPA y el hecho de que esta tecnología se despliega típicamente como tecnología multimodal en dispositivos LTE para ampliar la cobertura de roaming por banda ancha móvil, ocasionará un aumento en las tasas de transmisión en los próximos años, tal como se muestra en la figura 5, y además permitirá que HSPA+ siga presente en el mercado.

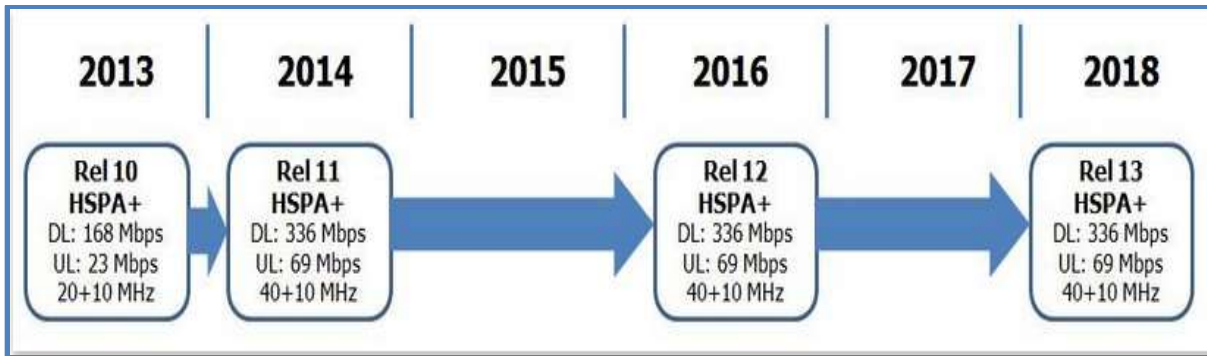


Figura 5: Aumento de las tasas de transmisión del estándar HSPA+ entre los años 2013 a 2018. Fuente: 4G Américas.

HSPA+ hace parte de las tecnologías que apuntan a alcanzar las características que de acuerdo a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) deberían tener las telecomunicaciones móviles internacionales avanzadas (IMT-Avanzadas), que son aquellos sistemas móviles dotados de nuevas capacidades que superan las ofrecidas en las IMT-2000. LA UIT las define como sistemas que dan acceso a una amplia gama de servicios de telecomunicación, en especial los servicios móviles avanzados, admitidos por redes fijas y móviles, que utilizan cada vez más la transmisión por paquetes.

Los sistemas de IMT-Avanzadas admiten aplicaciones de baja y alta movilidad y una amplia gama de velocidades de datos, de conformidad con las demandas de los usuarios y de servicios en numerosos entornos de usuario.

Las IMT-Avanzadas también tienen capacidades destinadas a aplicaciones multimedia de elevada calidad en una amplia gama de servicios y plataformas, lo que les permite lograr mejoras considerables de funcionamiento y calidad de servicio (Itu-R, 2008).

El reporte M.2134 también incluye algunas características que deben poseer las redes IMT avanzadas como son:

- Alto grado de uniformidad de la funcionalidad de todo el mundo, manteniendo la flexibilidad para soportar una amplia gama de servicios y aplicaciones de manera rentable.
- Compatibilidad de los servicios dentro de las IMT y con las redes fijas.
- Capacidad de interconexión con otros sistemas de acceso de radio.
- Servicios móviles de alta calidad.
- Equipo de usuario adecuado para su uso en todo el mundo.
- Equipos, servicios y aplicaciones fáciles de usar.
- Capacidad de itinerancia mundial.
- Mejorar las tasas de datos máximas para soportar servicios avanzados y aplicaciones (100 Mbps para alta movilidad y 1 Gbit /s para baja movilidad).

En cuanto al comportamiento de HSPA+ en distintos ambientes, estudios realizados por 3GPP en el año 2006 para el release 6 mostraron los efectos al usar modulación de 16 QAM en ambientes considerados como urbanos y suburbanos. La figura 6 ilustra la utilización de 16 QAM en dos pruebas de manejo llevadas a cabo en dos ambientes diferentes: un cluster urbano con distancia de 0,4 millas entre los sitios y el segundo en un ambiente suburbano con una separación de 1.2 millas. En el caso del medio ambiente urbano el porcentaje medio ponderado que el equipo del usuario estuvo en el modo de 16QAM fue de alrededor de 60%, y alrededor de 50% en el caso del medio ambiente suburbano (Tapia et al., 2009).

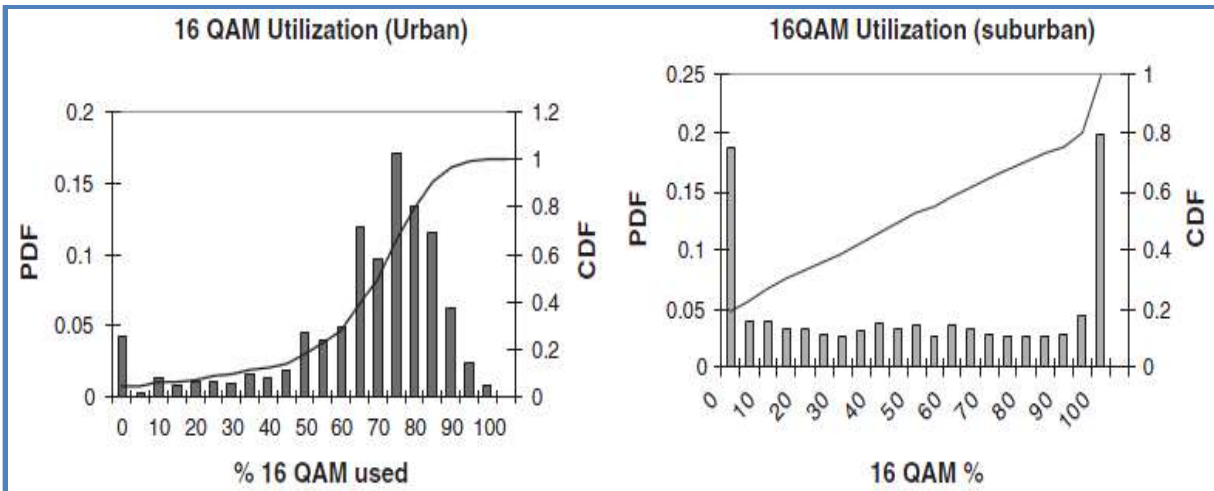


Figura 6: Porcentaje de uso de 16 QAM durante pruebas realizadas por el 3GPP en un cluster urbano (izquierda) y un cluster suburbano (derecha). Fuente: Tapia, (Op. Cit. p. 187).

2.4.2. Propagación

Los principios básicos de propagación de ondas electromagnéticas están dados en las ecuaciones de Maxwell, sin embargo la alta complejidad de la forma de propagación de una señal entre un transmisor y un receptor que están enlazados a través de un medio inalámbrico hace que el uso de dichas ecuaciones sea poco práctico, por lo cual se recurre a modelos de propagación que permiten determinar de forma mucho más sencilla las pérdidas por trayectoria en un sistema inalámbrico. En esta sección se describen algunos de los fundamentos básicos referente a pérdidas por trayectoria en un sistema inalámbrico.

2.4.3. Enlace de radio comunicación

De acuerdo a lo descrito por Blaunstein, “hay tres tareas principales al momento de diseñar e implementar sistemas de comunicación inalámbricos. La primera tarea es la operación del transmisor, incluyendo antenas y equipos electrónicos que controlan el

funcionamiento de la transmisión. La segunda tarea es comprender, modelar y analizar las propiedades de propagación del canal que conecta las antenas de transmisión y recepción. La tercera se refiere al estudio de toda la operación concerniente al receptor” (Blaunstein & Christodoulou, 2007a)

La investigación presentada en este documento se ha centrado en la tarea 2, específicamente en análisis de modelos de propagación. La figura número 7 muestra el esquema básico de un enlace inalámbrico de comunicaciones.

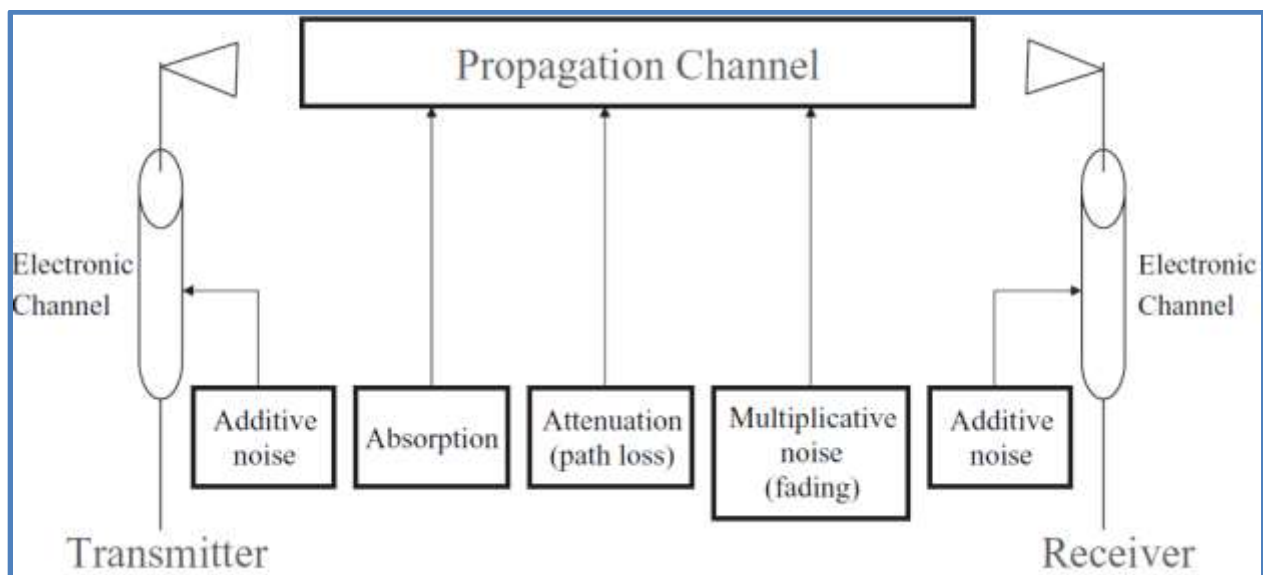


Figura 7: Esquema de un enlace inalámbrico de comunicaciones. Fuente: Blaunstein, N. y Christodoulou, C (ibid., p.2)

La figura 7 muestra los bloques correspondientes a un canal de propagación, el cual está influenciado por los distintos obstáculos que rodean a las antenas y condiciones ambientales existentes.

En canales de comunicación las ondas de radio recibidas llegan por varios caminos al mismo tiempo, lo cual comúnmente es conocido como propagación multitrayecto. Tales

ondas se combinan vectorialmente para dar una señal resultante oscilante. Numerosas investigaciones teóricas y experimentales han demostrado que las variaciones espaciales y temporales de nivel de señal tienen una triple naturaleza, siendo la primera la pérdida por trayectoria, que puede definirse como una disminución suave a gran escala en intensidad de la señal con la distancia entre dos terminales, principalmente el transmisor y el receptor.

Los procesos físicos que causan estos fenómenos son la propagación de las ondas electromagnéticas radiadas hacia el exterior por la antena del transmisor y los fenómenos de propagación (reflexión, difracción y dispersión) que se generan debido a la obstrucción por objetos naturales o hechos por el hombre en la trayectoria desde el transmisor al receptor. Las otras dos naturalezas son el desvanecimiento lento, causado por la difracción de las obstrucciones, y el desvanecimiento rápido de la señal, causado por la interferencia mutua de los componentes debido a los múltiples rayos (Blaunstein & Christodoulou, 2007b).

2.4.4. Mecanismos básicos de propagación

Rappaport (2002) enumera tres mecanismos básicos de propagación que tienen un efecto en los mecanismos de propagación que impactan los sistemas de comunicación móviles: reflexión, difracción y dispersión (p. 78).

Reflexión: Cuando una onda plana es incidente en un límite plano entre dos medios con diferentes permeabilidades μ_1 , μ_2 y permitividades ϵ_1 y ϵ_2 , a un ángulo θ_i , las

ondas transmitidas se reflejan y se refractan, como se muestran en la figura 8. (DU & Swamy, 2010)

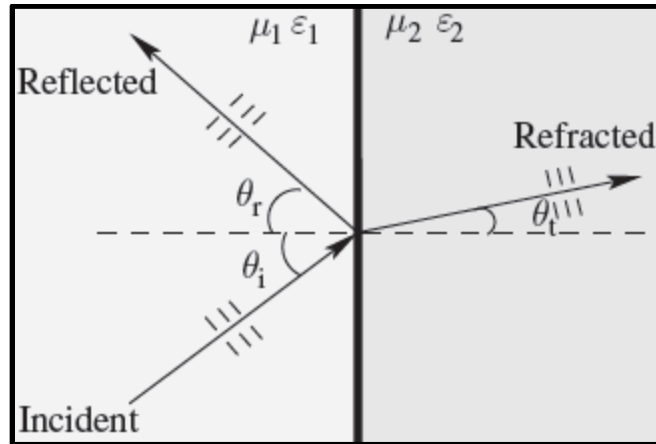


Figura 8: Reflexión y refracción: onda incidente sobre un plano. Fuente: Lin K., Swamy M.

Difracción: Es causada por discontinuidades en una superficie sobre la que incide una onda electromagnética. La difracción permite que las ondas de radio se propaguen alrededor de la superficie curva de la tierra y alcanzar posiciones detrás de obstrucciones (DU & Swamy, 2010).

A altas frecuencias la difracción, al igual que la reflexión, depende de la geometría de los objetos, también de la amplitud, fase y polarización de la onda incidente en el punto de difracción (Rappaport, 2002).

Los dos modelos canónicos para el análisis de difracción de una onda plana homogénea son difracción knife-edge o de pantalla y la difracción wedge. La difracción de pantalla se puede utilizar para modelar el efecto de propagación de una onda al

rodear una colina. La señal recibida es la suma del rayo con trayectoria directa y de los trayectos productos de la difracción. La figura 9 ilustra difracción por pantalla, donde d_1 y d_2 son las distancias entre el transmisor y el receptor a la parte superior del borde, respectivamente; y h_1 , h_2 y h son las alturas del transmisor, receptor y borde respectivamente (Rappaport, 2002).

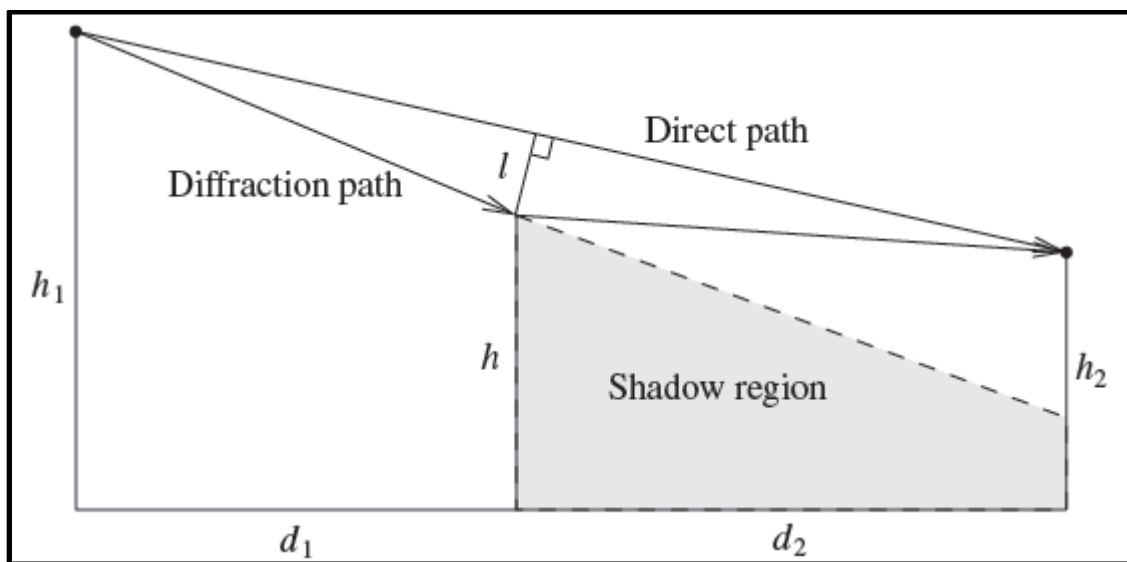


Figura 9. Difracción Knife-edge

Dispersión: La señal recibida real en entornos de telefonía móvil son a menudo más fuerte que lo que predicen los modelos de reflexión y refracción por si solos. Esto es porque cuando una radio incide sobre una superficie rugosa, la energía reflejada se extiende hacia fuera en todas las direcciones debido a la dispersión. Objetos tales como postes y árboles y árboles tienden a dispersar la energía en todas las direcciones. Las Superficies planas que tienen una dimensión mucho mayor que una longitud de onda, pueden ser modeladas como superficies reflectantes. Sin embargo, la

rugosidad de dichas superficies a menudo induce efectos de propagación diferentes de la reflexión especular. (Rappaport, 2002).

2.4.5. Path Loss

Las pérdidas por trayectorias son una medida de la atenuación de una señal y se pueden definir como una diferencia (en dB) entre la potencia efectiva transmitida y la potencia recibida y puede incluir o no la ganancia de las antenas. La pérdida por trayectoria, incluyendo la ganancia de las antenas, para el modelo del espacio libre vienen dadas por (Rappaport, 2002):

$$PL(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} \quad (1)$$

Donde P_t y P_r son la potencia de transmisión y de recepción respectivamente.

2.4.6. Tipos de desvanecimiento

El tipo de desvanecimiento experimentado por una señal que se propaga a través de un canal de radio móvil depende de la naturaleza de la señal transmitida, así como de las características del canal. Diferentes señales transmitidas en ese canal serán sometidos a diferentes tipos de desvanecimiento de acuerdo a la relación entre los parámetros de la señal, tales como la pérdida de trayectoria, ancho de banda (BW), periodo de símbolo, etc. y los parámetros de canal tales como dispersión del retardo y propagación Doppler. (Salazar-palma & Bonneau, 2003)

El fenómeno de desvanecimiento a gran escala se ve afectado principalmente por la presencia de colinas, bosques y edificios entre el transmisor y el receptor. Las estadísticas de desvanecimiento de gran escala proporcionan una manera de calcular una estimación de la pérdida de trayectoria como una función de la distancia y otros factores. Se dice que en un canal hay desvanecimiento selectivo en frecuencia cuando la dispersión del retardo es mayor que el periodo de símbolo. Esta condición se produce cuando los componentes de trayectorias múltiples recibidos de un símbolo se extienden más allá de la duración de tiempo de los símbolos (Salazar-palma & Bonneau, 2003).

Tanto el desvanecimiento rápido como el desvanecimiento lento se clasifican sobre la base de la rapidez con que se dan los cambios en la señal de banda base transmitida en comparación con la tasa de cambios de los parámetros eléctricos de la canal. Si los impulsos de canal respuesta cambian a un ritmo mucho más rápido que la señal transmitida, el canal pueden ser asumidas como un canal de desvanecimiento rápido. De lo contrario, se supone que es un canal de desvanecimiento lento.

Es importante señalar que la velocidad del móvil o la velocidad de los objetos que hacen uso del canal a través de una señal de banda base determina si una señal se somete a desvanecimiento rápido o lento (Salazar-palma & Bonneau, 2003).

2.5. MODELOS EMPÍRICOS PARA CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR TRAYECTORIA

En un artículo de revisión del año 2013, Phillips et. al, proponen una nueva clasificación de modelos de propagación, agrupando siete categorías principales y cuarenta subcategorías que resultaron después de hacer una revisión del estado del arte de modelos de propagación sesenta años atrás a la presentación del documento. La figura 6 muestra un árbol con la topografía propuesta.

Las siete categorías que proponen son:

- Modelos teóricos fundamentales.
- Modelos básicos.
- Modelos topográficos.
- Modelos complementarios.
- Modelos estocásticos de desvanecimiento.
- Modelos de varios rayos.
- Modelos de medición activa.

En el caso de la investigación presentada en este documento, el estudio se centra en modelos que se pueden clasificar como básicos de acuerdo a la taxonomía propuesta por (Phillips et al., 2013).

Los modelos básicos son posiblemente los más numerosos, tal como puede observarse en la figura 10. En general estos modelos calculan las pérdidas por trayectoria a lo largo de un camino único y con frecuencia utilizan correcciones basadas

en las mediciones efectuadas en uno o más ambientes. En resumen, utilizan la distancia, frecuencia portadora, y alturas de la antena del transmisor y del receptor como parámetros de entrada (Phillips et al., 2013).

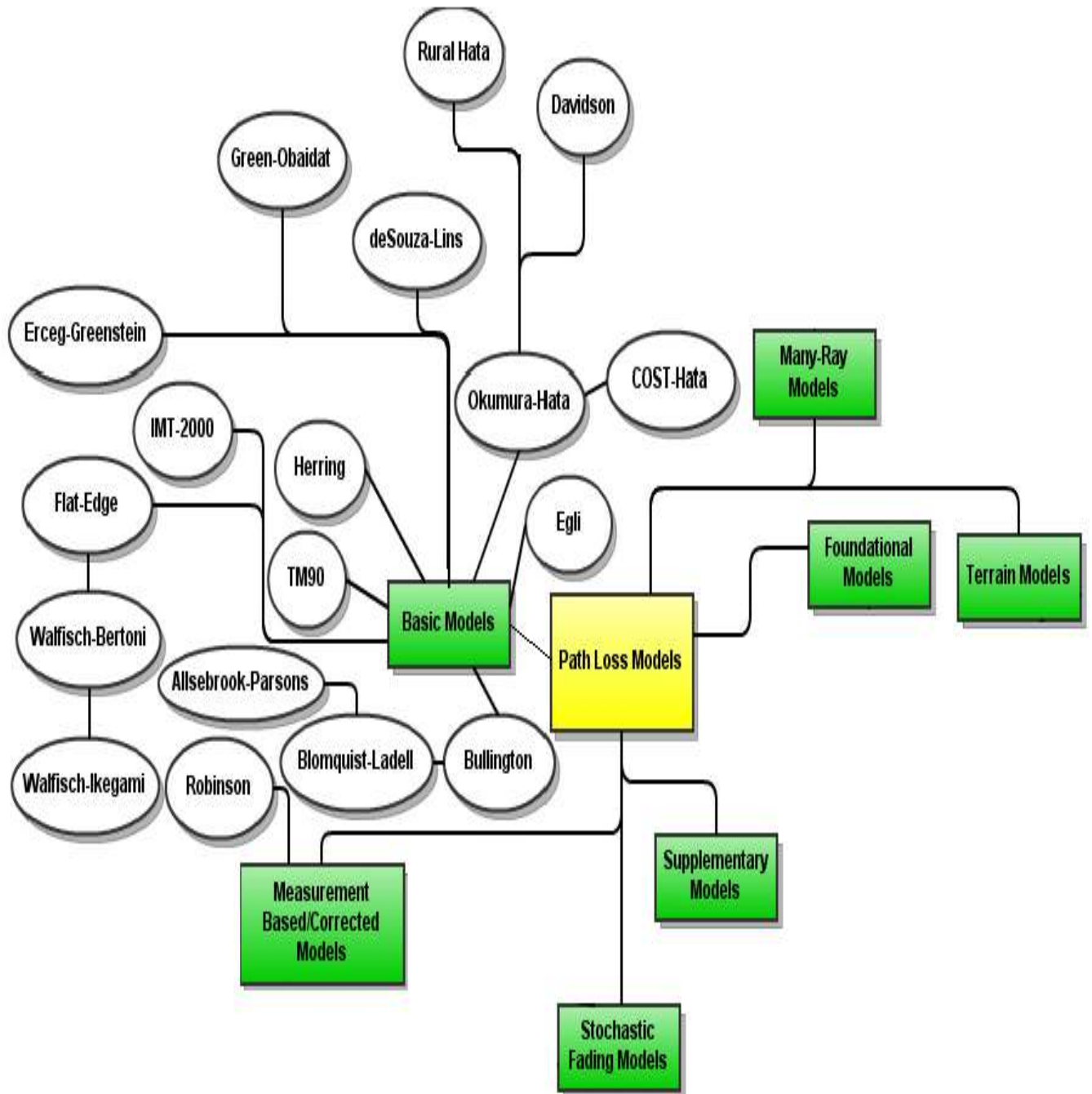


Figura 10. Árbol de modelos de propagación. Recategorización propuesta por Phillips et. Al

Sin importar el tipo de modelo usado, todos buscan determinar las pérdidas que existen entre la antena transmisora y la antena receptora. El cálculo de potencia de todo el enlace de radio se resume en la fórmula de presupuesto de enlace mostrado en la ecuación número 2 (Phillips et al., 2013):

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - PL \quad (2)$$

Donde P_{rx} y P_{tx} son la potencia recibida en el receptor y la efectiva del transmisor respectivamente. G_{rx} es la ganancia de la antena del receptor ubicada en dirección al transmisor. G_{tx} es la ganancia de la antena del transmisor. Por último P_L corresponde a toda la atenuación debido a las pérdidas por trayectoria. Se supone que el enlace deberá estar aislado de cualquier fuente de ruido externo en el medio ambiente (por ejemplo ruido térmico e interferencia de otros transmisores).

2.5.1. Análisis de modelos de propagación empíricos

El constante crecimiento de las ciudades, aumento en el número de construcciones y el desarrollo de servicios de comunicaciones inalámbricos; son factores que permitieron el desarrollo de los modelos de propagación para exteriores e interiores.

Con el auge de los servicios de comunicaciones inalámbricas en la década de 1940 muchos investigadores y profesionales vinculados al área, empezaron a trabajar y a desarrollar herramientas para predecir y ponderar las pérdidas por trayectoria de una señal que viajaba en el aire y en diferentes escenarios, y en la cual se podían variar

diferentes parámetros del sistema como frecuencia, altura de la antena de transmisión y altura de la antena receptora entre otros.

(Salazar-palma & Bonneau, 2003) plantearon la existencia de dos modelos principales para la caracterización de pérdidas de camino en un canal. Unos son los modelos estadísticos y los otros son los determinísticos. Los primeros resultan más fáciles de implementar ya que se basan en la caracterización estadística de la señal que llega al receptor, requieren sistemas computacionales menos complejos y son menos sensibles a la geometría del medio ambiente.

En los segundos ocurre todo lo contrario, se requiere más recurso computacional, mucha más información y un mayor análisis físico y matemático; con la ventaja de ser más precisos que los modelos estadísticos.

En 1946 el ingeniero danés Harald Friis presenta un modelo de propagación que permite determinar las pérdidas por trayectoria pero en un ambiente casi ideal como lo es por ejemplo, el espacio libre. Friis determinó que la señal se degrada en función de la distancia al cuadrado (d^2). En su momento Friis planteó la necesidad de hacer correcciones a su fórmula cuando esta quisiera ser aplicada en otras condiciones como por ejemplo incluir la absorción en el medio de transmisión (Friis, 1946)

John Egli en 1957 planteó un modelo empírico a través de mediciones hechas en la ciudad de New York y sectores de New Jersey. Este modelo funciona adecuadamente

para frecuencias entre 30 MHz y 3 GHz y es un método basado en numerosas gráficas (Egli, 1957)

En 1968 se presenta el modelo empírico de Okumura-Hata, donde las mediciones hechas por Okumura en algunas zonas de Tokio (Japón) se aproximan con las ecuaciones propuestas por Hata en su modelo. Este modelo se considera válido para frecuencias de 150 MHz a 1500 MHz, alturas de transmisor entre 30m a 200m y altura del receptor entre 1m y 10m. Debido a su efectividad y simplicidad, el modelo de Okumura-Hata ha sufrido numerosas ampliaciones y correcciones como el COST-Hata, Hata-Davidson y el ECC-33 entre otros (Phillips et al., 2013).

En 1980, Hata toma una fórmula del informe de Okumura con el fin de realizar ajustes y poner los resultados al servicio de un sistema computacional para calcular pérdidas por trayectorias en sistemas radio móvil terrestre en las bandas de VHF y UHF. En dicha investigación, la ecuación del modelo contempla recomendaciones que deben tenerse en cuenta al momento de aplicarla (Hata, 1980).

El modelo COST 231-HATA fue planteado en 1993 y básicamente es una extensión a una banda de frecuencia más alta, 1500 MHz a 2000 MHz, del modelo propuesto por Hata en 1980, válido para 150MHz a 1500MHZ. Este último modelo es por sí mismo una formulación en ecuaciones de uno anterior desarrollado por Okumura y que en el momento de la ingeniería se hizo sobre la base de gráficos, tablas y reglas deslizantes. Este modelo se diseñó básicamente para ser utilizado en entornos de macrocélulas, es

decir, para distancias entre la estación base (BS) y el terminal móvil (MT) de unos pocos kilómetros, por lo menos. Las pérdidas por trayecto en este modelo están dadas por (Tahat & Alqudah, 2011):

$$PL = 46.3 + 33.9 \log_{10} f - 13.82 \log_{10} h_b - ah_m + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10} d + C_m \quad (3)$$

Dónde f es la frecuencia de operación en GHz, h_b es la altura de la antena de la estación base (en metros). El parámetro C_m es un ajuste para la altura de la antena del receptor y depende del escenario. Es igual a 0 dB para ambientes suburbanos y de 3 dB para áreas urbanas. Para áreas urbanas el parámetro ah_m es igual a:

$$ah_m = 3.2(\log_{10}(11.75h_r))^2 - 4.79 \quad (4)$$

Donde h_r es la altura de la antena del equipo receptor.

Para áreas urbanas, ah_m es igual a:

$$ah_m = (1.11 \log_{10} f - 0.7)h_r - (1.5 \log_{10} f - 0.8) \quad (5)$$

En 1999, Erceg plantea un nuevo modelo empírico, el cual se deriva de mediciones tomadas en 95 macroceldas en diferentes puntos de los Estados Unidos en la banda de frecuencia de los 1900 MHz (Erceg et al., 1999). El modelo de la Universidad de Stanford extiende el modelo Hata para permitir la predicción para frecuencias superiores a 2 GHz, en áreas boscosas y con colinas que tienden de moderada a fuerte

y tamaño de las celdas de hasta 8 km. El escenario específico para este modelo es el siguiente: Altura de la antena en la estación base de 10 a 80 metros, altura de la antena receptora entre 2 m y 10 m, y radio de la celda entre 0,1 kilómetros y 8 km.

El modelo SUI distingue tres tipos de terrenos (Ardila, 2012):

Tipo A: asociado a la mayor cantidad de pérdidas, adecuado para terreno montañoso o con colinas, y con moderada o abundante presencia de vegetación.

Tipo B: tipo intermedio; puede tratarse de terreno llano con bastantes árboles o terreno montañoso con poca vegetación.

Tipo C: asociado con la mínima pérdida, apropiado para terreno llano con poca vegetación.

En la tabla 1, se muestran los valores de a, b y c para diferentes categorías de escenarios:

Tabla 1. Valores de las constantes del modelo SUI.

Parámetros del modelo	Categoría del terreno		
	a	b (1/m)	c (m)
A	4.6	0.0075	12.6
B	4	0.0065	17.1
C	3.6	0.005	20
S	10,6	9,6	8,2
H	10,8	10,8	20

La expresión que define las pérdidas para este modelo se muestra a continuación:

$$PL = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + S \quad (6)$$

Donde A es una cantidad fija dada por las pérdidas por trayectoria en el espacio libre (Erceg et al., 1999), y viene dada por:

$$A = 20 \log_{10} \left(4\pi d_0 / \lambda \right) \quad (7)$$

Donde $d_0=100$ metros, λ es la longitud de onda en metros, Y es el exponente de pérdidas por trayectos, el cual es una variable gaussiana aleatoria respecto a la población de macrocélulas dentro de cada categoría de terreno y viene dado por:

$$\gamma = a + bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (8)$$

En la cual h_b es la altura de la estación base, que puede ir de 10 metros a 80 metros y a, b y c son constantes, las cuales se muestran en la tabla 1.

X_f y X_h son factores de corrección para la frecuencia y la altura del receptor, respectivamente y vienen dados por:

$$X_f = 6 \log \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (9)$$

$$X_h = H \log \left(\frac{h_r}{2000} \right) \quad (10)$$

S es el factor de desvanecimiento y su valor puede encontrarse en la tabla 1.

El modelo COST-231 – Walfisch- Ikegami es uno de los más usados en la actualidad. Fue desarrollado en 1993, y es un modelo con mayor complejidad ya que contempla más parámetros que la mayoría de los mencionados anteriormente. Este modelo es recomendado por el sector de radiocomunicaciones de la Unión Internacional de

Telecomunicaciones (UIT-R) para su uso en las actividades normativas de las Comunicaciones móviles internacionales (IMT-2000). Es válido para las alturas del transmisor 4 a 50 m, altura de la antena receptora de 1m a 3m y frecuencias que van de 800 a 2000 MHz. Se puede introducir un factor de corrección adicional para las frecuencias mayores a 2000 MHz. Las pérdidas por trayectoria para este modelo están dadas por:

$$L_b = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd} & \text{para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0 & \text{Para } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

Donde L_0 son las pérdidas en el espacio libre, L_{rts} corresponde a las pérdidas por difracción azotea-calle y a las pérdidas por dispersión y L_{msd} son las pérdidas por difracción multiscreen. La figura 11 muestra los parámetros más importantes para este modelo.

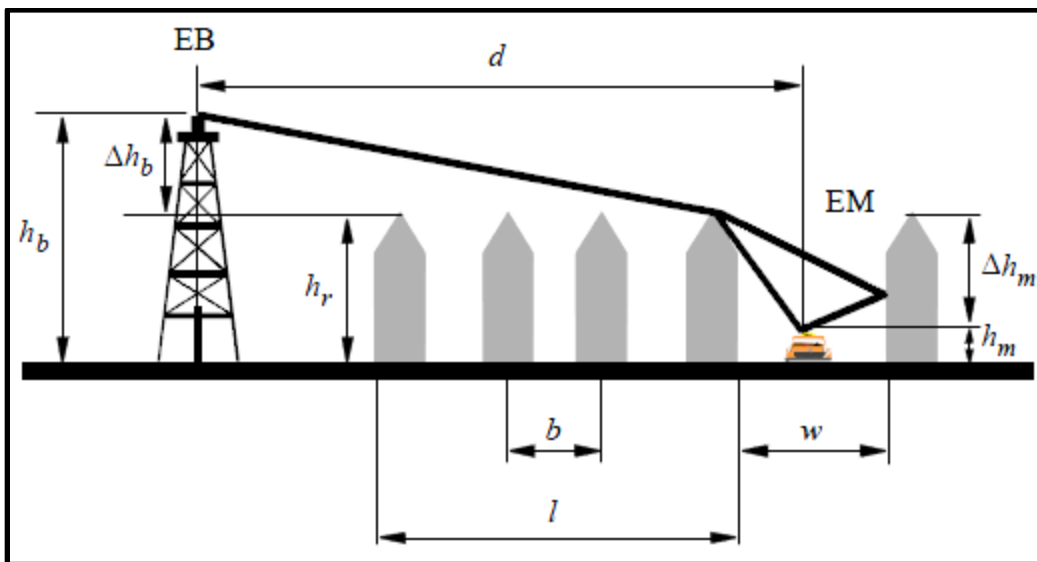


Figura 11: Parámetros del modelo Walfisch Ikegami. Fuente: Recomendación UIT-R P.1411

Las pérdidas en el espacio libre vienen dadas por:

$$L_o = 32.4 + 20 \log d + 20 \log f \quad (12)$$

Donde d es la distancia en metros y f es la frecuencia en MHz.

Las pérdidas por difracción azotea calle están dadas por:

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log_{10} W + 10 \log_{10} f + 20 \log_{10}(\Delta h_{mobile}) + L_{ori} \quad (13)$$

Donde W es el ancho de las calles (en metros), Δh_{mobile} es la diferencia entre la altura media de los edificios que rodean la radio base y la altura de la antena del móvil y L_{ori} es una atenuación empírica que depende del ángulo incidente, la cual viene dada por:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\phi & \text{para } 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\phi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (14)$$

La figura 12 muestra el ángulo de incidencia para el modelo Walfisch Ikegami:

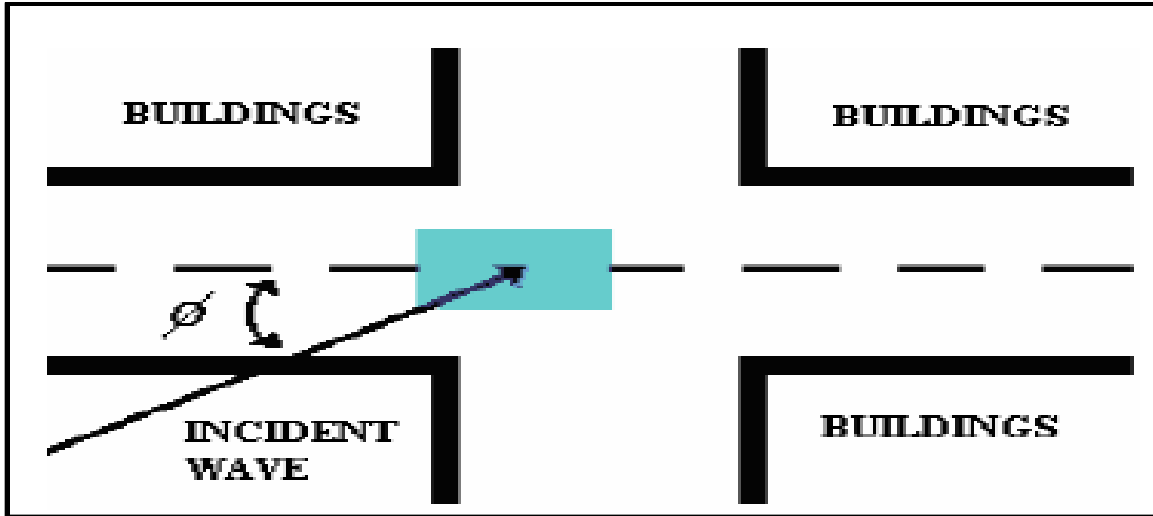


Figura 12: Ángulo incidente entre la estación base y el móvil.
Fuente: (Rozal, Pelaes, Ufpa, & Pará, 2007)

Las pérdidas debido a la difracción azotea-calle vienen expresadas por:

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d \log_{10} d + k_f \log_{10} f - 9 \log_{10} b \quad (15)$$

Donde L_{bsh} y K_a representan el aumento de las pérdidas por trayecto debido a la menor altura de la estación base. L_{bsh} viene dada por:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_b) & \text{para } h_b > h_{\text{roof}} \\ 0 & \text{para } h_b \leq h_{\text{roof}} \end{cases} \quad (16)$$

K_a viene dada por:

$$K_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_b > h_{\text{roof}} \\ 54 - 0.8\Delta h_b & \text{para } d \geq 0.5 \text{ km y } h_b \leq h_{\text{roof}} \\ 54 - 1.6\Delta h_b d & \text{para } d < 0.5 \text{ y } h_b \leq h_{\text{roof}} \end{cases} \quad (17)$$

K_d y K_f controlan la dependencia de la pérdida por difracción multipantalla frente a la distancia y la frecuencia de operación, respectivamente. K_d se da por:

$$K_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_b > h_{\text{roof}} \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_{\text{roof}}} & \text{para } h_b \leq h_{\text{roof}} \end{cases} \quad \text{Ecuación (17)}$$

Mientras que K_f viene dada por:

$$K_f = -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad \text{Ecuación (18)}$$

Otro de los modelos ampliamente utilizados en la actualidad es el modelo de Lee, esto se debe a su buena capacidad para lograr una buena precisión de las predicciones, además de ser sencillo. Su nivel de predicción puede mejorarse si se agregan más datos en la medición.

El método de Lee se basa en un modelo de tierra plana, y usa factores de corrección para la altura de las antenas y también para la frecuencia, y además puede ser fácilmente personalizado para el medio ambiente local (Chebil et al., 2011). Lee utiliza una pérdida de trayectoria media de referencia en una rango de 1 Km a la cual llama L_0 , la pendiente de la curva de la pérdida por propagación; γ en dB/década y un factor de ajuste F_0 . La pérdida media a una distancia d , está dada por:

$$P_L(d)(\text{dB}) = L_0 + \gamma \log_{10} d - 10 \log_{10} F_0 \quad (\text{Ec. 19})$$

Dónde L_0 son las pérdidas en el espacio libre, d es la distancia entre transmisor y receptor y F_0 es un factor de ajuste que comprende varios factores y puede ser expresado como:

$$F_0 = F_1 F_2 F_3 F_4 F_5 \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde F_1 , F_2 , F_3 , F_4 y F_5 representan factores de corrección de la altura de la antena de la estación base, de la ganancia de la antena de la estación base, de la altura de la antena del móvil, de la frecuencia y de la ganancia de la antena del móvil.

Otros modelos existen y han sido ajustados y planteados para diferentes escenarios. Sin embargo, al hacer una revisión bibliográfica encontramos que los detallados anteriormente son los más usados para determinar pérdidas por trayectoria, ya que su efectividad ha sido comprobada en estudios realizados durante muchos años y en diferentes escenarios. Teniendo en cuenta que el tema de investigación propuesto contempla el estudio de modelos de propagación usados para el diseño de redes de datos móviles, a continuación se muestran investigaciones que guardan relación.

Como se mencionó anteriormente, (Erceg et al., 1999), plantea un modelo estadístico que se origina de las mediciones experimentales hechas en la banda de 1.9 GHz en diferentes macroceldas en Estados Unidos y que además toma como base el modelo Okumura - Hata. La ecuación resultante aplica para áreas urbanas y además hace una diferenciación entre distintas categorías de terreno. Lo relevante de este modelo es que aplica para diferentes longitudes y alturas de antena, lo cual no estaba muy bien cubierto por los modelos de ese entonces. Las conclusiones demostraron que era válido para alturas de antenas entre 10 y 80 metros, distancias de la estación base

entre 0.1 y 8 kilómetros y para tres diferentes categorías de terreno. Los autores propusieron en ese momento que el modelo se actualizara con nuevas mediciones.

En Latinoamérica también se han llevado a cabo estudios de propagación. (Rozal et al., 2007) realizaron un ajuste al modelo Walfisch – Ikegami utilizando regresión lineal múltiple. La variable dependiente es la potencia de la señal recibida y las dependientes son la altura de los edificios y la distancia entre edificios. El modelo se validó realizando comparaciones entre las mediciones obtenidas en la simulación y las obtenidas en una campaña de medición y que incluyó 21 calles de la ciudad de Belém-Pará en Brasil. Los resultados mostraron un error promedio de 1.53 dB con relación a la señal medida en las 21 calles seleccionadas de la ciudad ya antes mencionada.

Otros autores han tomado como base de sus estudios el modelo de pérdidas en el espacio libre (Shittu, Bajoga, Anwar, & Salami, 2008). En esta investigación se realizó un ajuste al modelo de propagación de pérdidas en el espacio libre y a las fórmulas de Hata. Las mediciones se realizaron en una red celular al norte de Nigeria. Los resultados mostraron que la aplicación directa de estas fórmulas no es apropiada para la predicción de la señal en la región de investigación por lo cual se añadieron algunos factores de corrección. El nuevo modelo originado por el proceso de ajuste, es válido para la zona al norte de Nigeria y para la mayor parte de la región sub-sahariana, las cuales fueron las zonas de estudio. Los autores plantearon la necesidad de validar el nuevo modelo en otras zonas.

En (Chebil et al., 2011) también se concentraron en la comparación de modelos. En 2010 establecieron un procedimiento para comparar cuatro modelos de propagación: Lee, Interino de la Universidad de Stanford (SUI), COST-231 Hata y el modelo Egli. Realizaron mediciones en el Campus de la Universidad Putra Malasia y los datos obtenidos se usaron para realizar las validaciones. Los resultados mostraron que el modelo de Lee presenta un mejor rendimiento para las pérdidas por propagación en el medio. Es importante aclarar que este modelo ajustado de Lee, con las pruebas realizadas, es aplicable al área urbana de Kuala Lumpur; y para otras regiones deberían validarse los modelos para determinar los resultados.

Otros trabajos se han concentrado en verificar los niveles de predicción de diferentes modelos pero a distinta frecuencias. (Baumgarten et al., 2011) evaluaron varios modelos en una zona rural de Alemania. Realizaron mediciones en las bandas de 860 MHz, 2300 MHz y 3500 MHz; y se compararon los resultados con modelos ya validados como el Interino de la Universidad de Stanford y el Hata extendido. Como resultado los investigadores determinaron el modelo más adecuado para cada una de las frecuencias mencionadas anteriormente. Los resultados plantean que la metodología usada y las predicciones obtenidas son válidas para una zona rural de poca vegetación y no para zonas densamente urbanizadas y con zonas boscosas más extensas.

En 2013, en la onceava conferencia internacional de comunicaciones en Malasia, se presentan los resultados de una investigación sobre niveles de predicción de modelos

de propagación. A partir de los resultados obtenidos se desarrolló un modelo empírico para determinar la potencia recibida por un móvil en un ambiente urbano, específicamente en la ciudad India de Hyderabad. En este caso se trabajó con una red celular con interfaz aérea GSM en la banda de frecuencia de los 900 MHz, y la herramienta para recolectar datos fue el Test Mobile System (TEMS).

Para obtener el modelo se compararon tres diferentes modelos empíricos ya validados (COST-231 Hata, Interino de la Universidad de Stanford y el Extendido de Okumura Hata) con respecto a los datos obtenidos experimentalmente. Los resultados demostraron que el modelo COST-231 Hata presenta mejores niveles de predicción con respecto a los otros dos estudiados (A. Bhuvaneshwari, Hemalatha, & Satyasavithri, 2013).

Bhuvaneshwari en 2013 también comparó modelos de propagación empíricos en ambientes suburabanos. En este caso la recolección de datos se hizo en una región al sur de India, específicamente en los alrededores de la Universidad de Osmania, que es una zona considerada de tipo suburbano. Para este estudio nuevamente se trabajó con una red celular GSM en la banda de frecuencia de los 900 MHz, y la herramienta para recolectar datos fue el TEMS. Se compararon dos modelos: COST-231 Hata y el Interino de la Universidad de Stanford (SUI). Los resultados demostraron que el modelo SUI tiene un error de predicción más bajo que el COST-231 para el caso en estudio. No se tuvieron en cuenta otros modelos y tampoco se presenta un ajuste del modelo.

En lo que respecta a Colombia, no son muchos los estudios de propagación que se encuentran en la literatura consultada en las bases de datos. Posiblemente los investigadores que más resultados han presentado sobre investigaciones similares en Colombia son los Ingenieros Carlos Ardila y Andrés Navarro, los cuales han presentado varios artículos sobre estudios de propagación y ajuste de modelos empíricos de pérdidas por trayectorias llevados a cabo en la ciudad de Cali. Por ejemplo llevaron a cabo un procedimiento para ajustar estadísticamente los modelos de Okumura Hata y de Walfisch Bertoni en la ciudad anteriormente mencionada. El ambiente escogido para este trabajo fue una zona considerada como urbana y se llevó a cabo un test donde se obtuvieron 35313 mediciones y se corrigieron errores del sistema de posicionamiento que se tuvieron en una investigación previamente realizada en el mismo escenario (Mejia & Ardila, 2009). Para el proceso de ajuste se utilizó regresión lineal y a diferencia de otras investigaciones, en esta los autores presentan la eliminación de 8652 de los datos obtenidos experimentalmente (Navarro & Ardila, 2012).

Otros autores como (Garcia-Alvarez & Rogriguez, 2002) también han llevado a cabo trabajos en Colombia sobre modelos de pérdidas por trayectoria en sistemas móviles de comunicación, sin embargo en este caso realizaron comparaciones de modelos de propagación a través de simulaciones. En este caso el escenario de estudio fueron algunas zonas del departamento de Caldas y su estudio plantea la necesidad de futuras mediciones para realizar el proceso de comprobación.

Otros estudios similares se han realizado en Colombia pero diferente a sistemas de telefonía móvil. (Ariza, 2012) llevó a cabo un Estudio de propagación en una red de televisión digital terrestre, analizando el caso para recepción fija y recepción móvil en el escenario metropolitano de la ciudad de Bogotá D.C., Colombia.

A pesar que los estudios sobre pérdidas por trayectoria vienen desarrollándose desde principios de la década de los 40 en el siglo XX, es necesario seguir probando la validez de cada modelo en los diferentes casos de estudio, aun en los escenarios para los cuales fueron creados originalmente.

Es contante el cambio arquitectónico que sufren las ciudades y eso implica modificaciones en alturas promedios de edificios, cambios en los materiales de construcción, cambios en los anchos de vías, variación en la densidad de árboles, aumento en el tráfico de vehículos y peatones y otros factores más; que al final impactan los niveles de predicción de los modelos de propagación empíricos creados a la fecha y usados ampliamente.

Los resultados de las distintas investigaciones muestran que en la mayoría de los casos es necesario hacer ajustes a los modelos de propagación que quieran ser usados en escenarios distintos para los que fueron creados. Aun cuando exista cierta similitud en la zona donde se aplicará la ecuación de pérdidas por trayectoria con respecto al ambiente para el cual fue diseñado, algunos cambios en el escenario

pueden impactar negativamente los valores de predicción y provocar altos niveles de error.

Por último, las estadísticas de operadores, fabricantes, entidades gubernamentales y organizaciones reguladoras; demuestran que en los próximos años las interfaces inalámbricas, en especial de los sistemas móviles, seguirán en crecimiento y de un buen diseño de estas redes dependerá en gran parte la calidad del servicio prestado a los usuarios, para lo cual se deberá contar con modelos de propagación que ayuden a una buena planificación.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En la presente investigación se hace referencia al análisis de modelos empíricos de pérdidas por trayectoria en sistemas móviles de comunicaciones. Si bien es cierto que el análisis permite determinar cuál de los modelos estudiados proporciona los niveles de predicción más altos, también es cierto que es necesario realizar ajustes en el modelo seleccionado puesto que típicamente los modelos de propagación requieren de ajuste en otros escenarios.

Como se mencionó en la revisión del estado del arte, existen muchos modelos de propagación, siendo los empíricos los más abundantes. Para la selección de los modelos de esta investigación se tuvieron en cuenta factores como tipo de zona (urbana, suburbana, rural), frecuencia de operación del sistema de comunicaciones, altura de las antenas (transmisora y receptora) y tamaño de las celdas entre otros.

Muchos estudios de propagación consideraron ciudades con uniformidad en sus construcciones -altura de edificaciones, anchos promedio de vías, cumplimiento de las

restricciones del modelo-, sin embargo para el caso estudio (Barranquilla, Colombia) esta situación no se cumple, por lo cual este trabajo consideró valores promedios como por ejemplo la altura de los edificios. En otros casos se utilizaron las recomendaciones del reporte Final COST-231 y de la UIT para establecer valores de parámetros como ancho de calles y distancias entre edificios; así como la denominación de zonas urbana o suburbana, lo cual impacta los resultados teóricos y el ajuste final. Por lo anterior y además por cantidad de información disponible para poder realizar los cálculos teóricos, se decidió trabajar con tres modelos que son ampliamente utilizados en investigaciones similares: COST-231 Hata, Walfisch Ikegami y el Interino de la Universidad de Stanford (SUI).

Con respecto a la metodología usada para la obtención de datos, también fue importante la revisión de la bibliografía para utilizar esquemas de medición similares a los utilizados en otras investigaciones a fin de validar la información obtenida. De este modo se limitó la toma de mediciones a los sectores más representativas de la ciudad para los ambientes urbanos y sub-urbano en estudio, dada la limitación en el uso de los equipos y sus costos asociados.

Tres modelos de propagación: COST-231 Hata, Walfisch Ikegami e Interino de la Universidad de Stanford, fueron seleccionados para determinar sus niveles de predicción en ambientes urbanos y suburbanos específicos de una ciudad colombiana: Barranquilla, los cuales fueron evaluados y comparados entre sí.

Además de la revisión del estado del arte, para la selección de los tres modelos antes mencionados también se tuvieron en cuenta las consideraciones sobre límites de los valores de sus variables y tipos de ambientes para los cuales fueron desarrollados. Los parámetros en consideración fueron el tipo de escenario para los cuales aplican cada modelo, tipo de celdas, frecuencia de operación, altura de las antenas de transmisión y alturas de la antena del receptor.

La figura 13 presenta el proceso metodológico implementado para desarrollar los objetivos específicos planteados en el capítulo 2. Para la revisión bibliográfica se recurrió principalmente a la base de datos del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) y a la información disponible en organismos como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones de Colombia, 4G Américas o el 3GPP; al igual que información proporcionada por fabricantes de equipos.

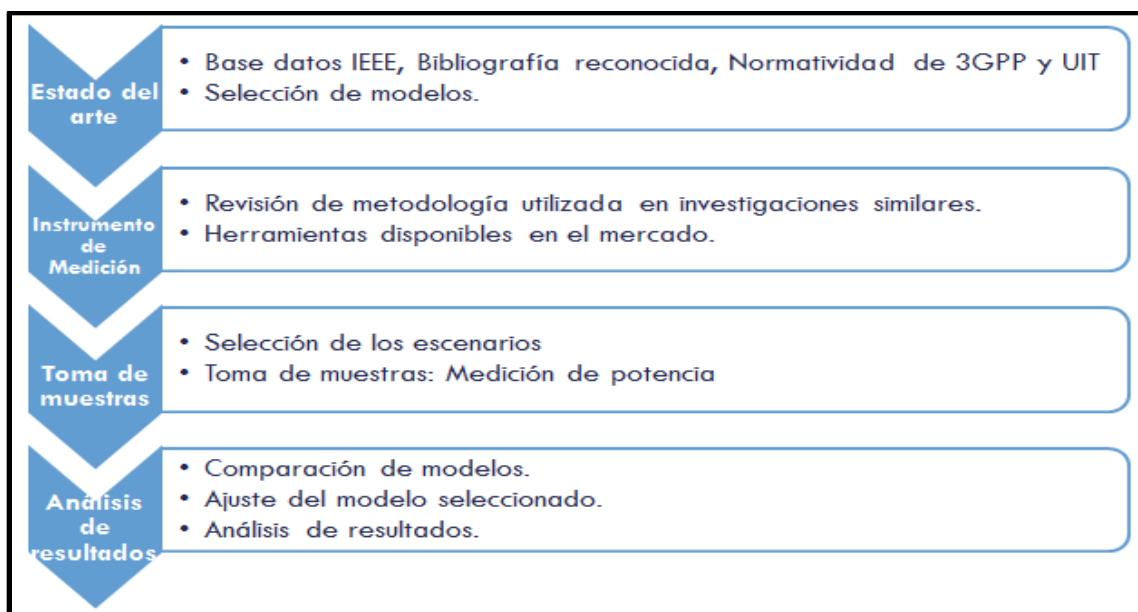


Figura 13. Proceso metodológico de la investigación. Fuente: Autor

La revisión del estado del arte ayudó a conocer metodologías aplicadas en investigaciones similares y que pudieron ser adaptadas a este caso. También permitió conocer herramientas para la obtención de los datos necesarios para posteriormente realizar la comparación de los modelos. Este capítulo presenta un breve informe de las consideraciones para la escogencia de los modelos, selección de las áreas del caso estudio, sistema de medición utilizado y detalle de los datos obtenidos.

3.1. MARCO CONTEXTUAL

Barranquilla es una ciudad localizada en el vértice nororiental del departamento del Atlántico, sobre la orilla occidental del río Magdalena, a 7,5 km de su desembocadura en el mar Caribe. Barranquilla se encuentra a una latitud $10^{\circ}59'16''$ al norte de la línea ecuatorial y una longitud de $74^{\circ}47'20''$ al occidente de Greenwich, tomando como referencia la plaza de la Paz, punto cero de la ciudad.

El área urbana está edificada sobre un plano ligeramente inclinado cuyas alturas extremas, según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, son 4 msnm al oriente y 98 metros al occidente, sobre el nivel del mar. Otras fuentes señalan alturas accidentales en las lomas, hasta de 120 metros fuera de la ciudad.

Posee una extensión total de 154 Km² y una temperatura media de 27.4 grados Celsius. La población de Barranquilla es de 1.386.865 habitantes, lo que la convierte en la cuarta población más habitada de Colombia. Entre los principales aspectos de su economía puede mencionarse su vocación portuaria lo que la convierte en uno de los principales puertos en el caribe colombiano, y además es el principal centro comercial, cultural y educativo de la región caribe colombiana por lo cual en 1993 se le dio la denominación de Distrito Especial Industrial y Portuario (Alcaldía de Barranquilla, 2010).

3.2. SELECCIÓN DE LAS ENTRADAS PARA LA INVESTIGACIÓN.

3.2.1. Zonas urbanas y suburbanas

La clasificación de una zona con la denominación de urbana, suburbana o rural; generalmente se hace a través de normatividades de las entidades encargadas de la planificación arquitectónica en cada país o ciudad. Al ocurrir esto se pueden encontrar clasificaciones diferentes en una misma ciudad, y entornos parecidos en dos ciudades pueden ser definidos de forma distinta, ya que en ocasiones el uso que se le da al suelo permite diversas distinciones.

En el caso concreto de este estudio se planteó el análisis de modelos de propagación en zonas urbanas y suburbanas, por lo cual se recurrió a la revisión bibliográfica para la conceptualización de este tipo de entornos en lo que se refiere a propagación de señales en el aire.

Para la selección de las zonas donde se llevaría a cabo el estudio de propagación y su caracterización como ambiente urbano y suburbano, se tuvo en cuenta la recomendación UIT-R P. 1411-7 de la Unión Internacional de comunicaciones, en la cual se clasifican los entornos de propagación desde el punto de vista radioeléctrico.

La propagación de las ondas radioeléctricas resulta influida por el entorno, es decir las estructuras y la altura de las construcciones, la utilización del terminal móvil (peatón/vehículo) y la posición de las antenas. Se identifican cinco entornos distintos

que se consideran los más habituales y por ejemplo, no se consideran las zonas con elevaciones, pues no son las habituales de las áreas metropolitanas (ITU-R, 2013a). La tabla 2 muestra cada entorno definido en la recomendación de la UIT-R y sus características principales.

Tabla 2: Entornos de funcionamiento físico – Degradaciones de la propagación.

Fuente: ITU-R

Entorno	Descripción y degradaciones de la propagación significativas
Urbano de construcción muy alta	<ul style="list-style-type: none"> – Valle urbano profundo con una gran actividad, caracterizado por avenidas con edificios de alta densidad y varias decenas de pisos, hecho que da como resultado un valle urbano profundo. – Los edificios de alta densidad y los rascacielos se alternan, hecho que da como resultado trayectos de propagación con abundante dispersión sin visibilidad directa. – Las hileras de edificios altos hacen posible la existencia de retardos muy largos de trayecto. – El tráfico intenso y el elevado flujo de visitantes en la zona actúan como reflectores, lo que añade una deriva Doppler a las ondas reflejadas – Los árboles y las calles proporcionan un ensombrecimiento dinámico.
Urbano de construcción alta	<ul style="list-style-type: none"> – Valle urbano, caracterizado por avenidas con edificios altos de varios pisos. – La altura de los edificios reduce la probabilidad de una contribución significativa de la propagación que pasa por encima de los tejados. – Las hileras de edificios altos hacen posible la existencia de largos retardos de trayecto. – El gran número de vehículos en movimiento en la zona actúa como reflector, lo que añade una deriva Doppler a las ondas reflejadas.
Urbano de construcción baja/Suburbano	<ul style="list-style-type: none"> – Típicamente calles anchas. – Las alturas de los edificios suelen ser inferiores a tres pisos, lo que hace probable la difracción por los tejados. – Pueden producirse en ocasiones reflexiones y ensombrecimientos producidos por los vehículos en movimiento. – Los efectos principales son: retardos grandes y pequeñas derivas Doppler.
Zona residencial	<ul style="list-style-type: none"> – Construcciones de uno y dos pisos. – Las calles suelen ser de doble dirección con vehículos estacionados a ambos lados. – Es posible que haya vegetación densa a ligera
Rural	<ul style="list-style-type: none"> – Pequeñas casas rodeadas de amplios jardines. – Influencia de la altura del terreno (topografía). – Posibilidad de vegetación densa a ligera. – Tráfico motorizado ocasionalmente elevado

La ciudad de Barranquilla cuenta con varios de los entornos determinados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en su reporte. Las dos zonas escogidas para llevar a cabo el estudio de propagación fueron:

Zona 1 (Urbana): Comprendida entre la calle 72 y 74, y entre la carrera 47 y 58. Ver figura 14, donde además se muestra la ruta recorrida. Esta zona presenta alta actividad, avenidas con alta densidad (calle 72 y carrera 54) y varios edificios de decenas de pisos como por ejemplo el edificio Miss Universo y el edificio Los ejecutivos. La arborización en este sector es abundante y el tráfico vehicular es fluido.

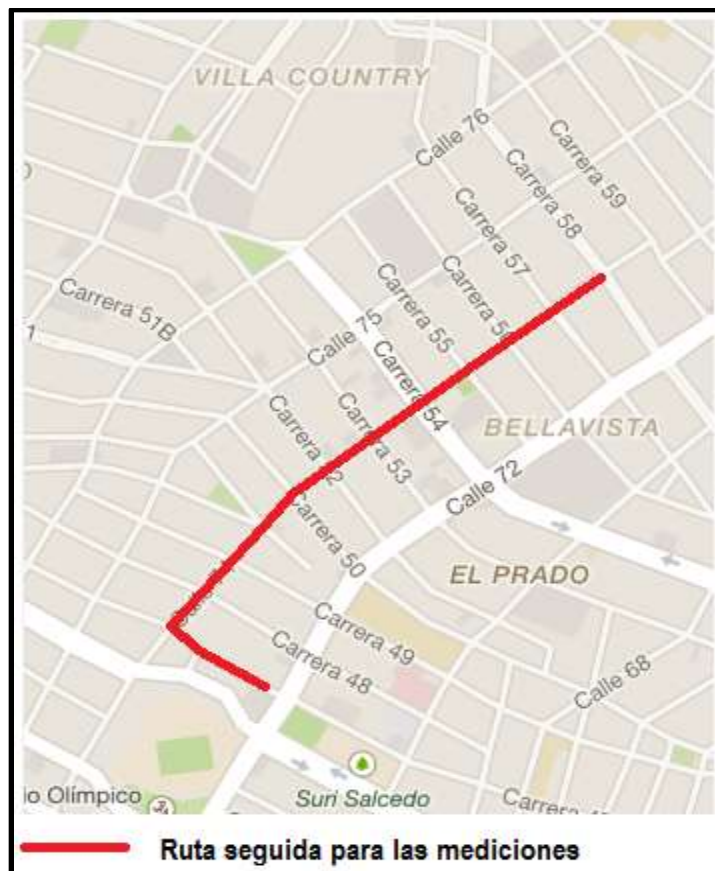


Figura 14. Ruta para mediciones de potencia en el ambiente urbano

Es importante aclarar que aunque se presentan edificaciones con más de diez pisos, no es común que se encuentren todas ubicadas en hileras y es frecuente pasar de estructuras muy altas a otras de dos tres pisos, tal como se puede observar en el anexo 1.

Zona 2 (Suburbana): Para esta clasificación se escogió el sector de la vía 40 entre calles 75 y avenida Circunvalar (figura 15. Esta zona presenta calles anchas, la mayoría de las edificaciones son de dos pisos (6 metros) y encontrándose casos de plantas industriales con altura promedio de 13 metros; la vegetación es ligera y en ocasiones nulas para algunas calles.



Figura 15. Ruta para mediciones de potencia en el ambiente suburbano

3.3. VELOCIDAD DE LOS MÓVILES

La velocidad de los móviles tiene un impacto directo sobre la tasa de transmisión en el canal descendente del enlace, por lo cual este parámetro debe tenerse en cuenta al momento de llevar a cabo la planificación de redes celulares, ya que lleva a desplazamientos Doppler diferentes para cambios en la velocidad (ITU-R, 2013a). La recomendación P.1411-7 presenta indicaciones en ese sentido y sus consideraciones se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Entornos de funcionamiento físico – Velocidad típica del móvil.

Fuente: ITU-R

Entorno	Velocidad de los usuarios peatonales (m/s)	Velocidad de los usuarios en vehículos
Urbano de construcción muy alta/ Urbano de construcción alta	1,5	Velocidades típicas del centro de la ciudad del orden de 50 km/h (14 m/s)
Urbano de construcción baja/ Suburbano	1,5	Unos 50 km/h (14 m/s) En autopistas hasta 100 km/h (28 m/s)
Residencial	1,5	Unos 40 km/h (11 m/s)
Rural	1,5	80-100 km/h (22-28 m/s)

Para la toma de mediciones se tuvo en cuenta la recomendación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sin embargo también se tomó en consideración el tráfico vehicular en las zonas de estudio y las recomendaciones de los encargados del manejo del equipo para la obtención de datos, los cuales realizan este tipo de pruebas regularmente por solicitud de los diferentes operadores celulares. Teniendo en cuenta lo anterior se realizó el test a una velocidad promedio de 40 kilómetros por hora, lo cual está dentro de los límites establecidos por la UIT-R.

3.4. SISTEMA DE MEDICIÓN

En el análisis de modelos de propagación empíricos, como es el caso de esta investigación, se busca determinar las pérdidas por trayectoria entre un transmisor y un receptor móvil o viceversa y para eso se recurre a las pruebas de manejo (drive test). En este caso el estudio se concentró en la medición de las pérdidas correspondientes al enlace descendente.

Las pruebas de manejo son exámenes realizados en redes de comunicaciones de sistemas inalámbricos a fin de recolectar datos en un área de interés. Este tipo de test implica la presencia de personal en una zona de cobertura del sistema donde se requieren las mediciones que en la mayoría de veces se utilizan para determinar cobertura.

Generalmente para llevar a cabo este proceso se requiere de equipos de medición bien desarrollados para tomar las muestras y almacenarlas, y un sistema de posicionamiento global para obtener la ubicación geográfica; los cuales se encuentran a bordo de un equipo que se desplaza tratando de mantener una velocidad constante. Con los vehículos de medición y los equipos de prueba en funcionamiento, el personal encargado recorre una ruta previamente trazada para realizar mediciones y almacenar sus registros (Hapsari et al., 2012).

Uno de los sistemas más utilizados para realizar este tipo de pruebas es el TEMS Investigation de la empresa ASCOM. El TEMS es una herramienta computacional

instalada en un computador portátil donde se registran y almacenan los datos recibidos a través de un teléfono móvil que establece conexión con una radiobase del operador. Además el ordenador con el TEMS se conecta por medio de uno de sus puertos con un GPS, de manera que se puede georeferenciar cada punto donde se hace una medida. Los puntos de medición vienen marcados por coordenadas geográficas con latitud y longitud.

Este sistema permite además conocer la radiobase de la cual se están obteniendo los datos y automáticamente hace el paso de una estación a otra. En caso de estar en una ubicación donde varias radiobases presentan cobertura, el TEMS puede tomar mediciones de la que presente los mejores niveles de señal. Investigaciones similares hicieron uso del TEMS como herramienta para realizar las mediciones (Chebil et al., 2011) (A. Bhuvaneshwari et al., 2013) (a. Bhuvaneshwari & Sathyasavithri, 2013)

La potencia recibida en el móvil es el parámetro a medir para calcular las pérdidas por trayectoria, por lo cual este fue el valor obtenido para el caso estudio. Sin embargo como se mencionó anteriormente, el TEMS arroja información adicional necesaria para el estudio.

3.5. TIPOS DE CELDAS

Cualquier ambiente donde se instale un sistema comunicación móvil requiere estudios del comportamiento de propagación de las ondas a través del medio y eso hace

necesaria una buena planeación. Estos serán instalados en entornos de grandes urbes, ciudades medianas o áreas rurales, de ahí la importancia de los estudios de propagación, ya que al tener escenarios diferentes; se hacen necesarios diferentes modelos para hacer predicciones en celdas de diferentes tamaños (Directorate-General Information society: Telecommunications, Markets, 1999).

El reporte final COST-231, auspiciado por la Unión Europea en 1999, indica que una definición única de tipo de celdas no está considerada en la literatura, por lo cual ellos plantean sus propias consideraciones, las cuales se presentan en la tabla 4:

Tabla 4: Definición de tipos de celdas. Fuente: COST-231 Report

Tipo de celda	radio típico de la celda	Posición típica de la antena de la estación base
Macro celda	1 Km a 30 Km	En exteriores, montada sobre el nivel medio de la azotea, la altura de todos los edificios de los alrededores están por debajo de la altura de la antena de la estación base
Macro celda pequeña	0.5 Km a 3 Km	En exteriores, montada sobre el nivel de la azotea medio, la altura de algunos edificios de los alrededores están por encima de la altura de la antena de la estación base
Micro celda	Hasta 1 Km	En exteriores, montada por debajo del nivel medio de la azotea
Pico celda	Hasta 500 m	En exteriores o interiores, montada por debajo del nivel medio de la azotea

La zona suburbana seleccionada para el estudio, se encontraba cubierta con quince celdas al momento de realizar la toma de muestras. La tabla 5 muestra las radiobases involucradas en el conjunto de mediciones del escenario suburbano, junto con su código de identificación, posición geográfica (latitud y longitud), altura de la antena y referencia.

Tabla 5: Radiobases del ambiente suburbano.

Celda	Ubicación geográfica		Altura de la antena (m)	Tipo de antena
	Latitud	Longitud		
28	11,00951944	-74,79827222	20	K742215_08T,dpa
43	11,0144	-74,7977	35	K742215_08T,dpa
78	11,011068	-74,791145	30	K742215_08T,dpa
107	11,0248	-74,8119	40	K742215_04T,dpa
167	11,03027778	-74,806944	30	K742215_05T,dpa
198	11,0144	-74,7977	35	K742215_08T,dpa
245	11,0248	-74,8119	40	K742215_06T,dpa
246	11,0395	-74,8268	40	K742215_03T,dpa
276	11,03027778	-74,806944	30	K742215_05T,dpa
280	11,011068	-74,791145	30	K742215_08T,dpa
376	11,011068	-74,791145	30	K742215_08T,dpa
421	11,03027778	-74,806944	30	K742215_05T,dpa
432	11,0033	-74,7903	33	K742215_03T,dpa
460	11,020196	-74,803465	20	K742215_05T,dpa
492	11,0395	-74,8268	40	K742215_01T,dpa

La zona urbana seleccionada para el estudio, se encontraba cubierta con nueve celdas al momento de realizar la toma de muestras. La tabla 6 muestra las radiobases involucradas en el conjunto de mediciones del escenario urbano, junto con su código de identificación, posición geográfica (latitud y longitud), altura de la antena y referencia.

La ubicación geográfica de cada radiobase es usada para calcular la distancia con respecto a cada punto donde se toma una medida de potencia recibida en el teléfono móvil conectado al TEMS.

Tabla 6: Radiobases del ambiente urbano.

Celda	Ubicación geográfica		Altura de la antena (m)	Tipo de antena
	Latitud	Longitud		
15	10,9925	-74,8081	33	K742215_08T,dpa
50	11,001243	-74,802044	12	K742215_04T,dpa
105	10,9983	-74,8059	20	K742215_08T,dpa
109	11,0005	-74,801	33	K742215_07T,dpa
128	10,9926	-74,8036	46	K742215_10T,dpa
218	10,92916	-74,78514	20	K742215_05T,dpa
257	10,9983	-74,8059	18	K742215_07T,dpa
430	10,9983	-74,8059	15	K742215_07T,dpa
477	11,0005	-74,801	33	K742215_08T,dpa

El tipo de antena es una referencia que se utiliza para saber la ganancia, de manera que este parámetro permite determinar las pérdidas en cada punto donde se tomó una medición, tal como se determina en la ecuación 2. Los datos técnicos de la antena se muestran en el anexo 2 y en el anexo 3 se muestra la ubicación de cada radio base utilizada para esta investigación.

Tomando como referencia el Reporte final COST-231, la información de altura de las antenas proporcionada por el operador y las mediciones obtenidas en cada uno de los ambientes, se obtienen datos que permiten determinar que existe una combinación de macroceldas y picoceldas en cada uno de los dos escenarios seleccionados para el estudio en la ciudad de Barranquilla.

En el caso del entorno suburbano predominan las denominadas macroceldas pequeñas con radios de cobertura que van de 0.13 Kilómetros hasta 2 Kilómetros

aproximadamente. En lo que respecta al escenario urbano, predominan las picoceldas, con radios de cobertura que van de 0.0422 Kilómetros hasta 0.53 Kilómetros.

3.6. ALTURA DE LA ANTENA DEL RECEPTOR

La altura de la antena del receptor es una variable contemplada en cada uno de los modelos analizados en esta investigación, y cada uno de ellos plantea unos límites de altura para los cuales el modelo fue planteado.

El modelo COST-231 Hata se contempló para altura de la antena de móvil que estén posicionadas entre 1 metro y 10 metros: este modelo contempla un factor de corrección de la altura del receptor llamado C_m que es de 3 dB para zonas urbanas y 0 dB para zonas suburbanas.

El modelo Walfisch Ikegami se diseñó para altura de antenas del receptor ubicadas entre 1 metro y 3 metros de altura.

El modelo Interino de la Universidad de Stanford se planteó para alturas de antenas receptoras de entre 2 metros y 10 metros, sin embargo también incluye un factor de corrección de la altura de la antena (X_h), tal como se puede apreciar en la ecuación 10.

Tomando en consideración las alturas para antenas receptoras que fue contemplada para cada modelo en sus inicios, se determinó ubicar la antena del teléfono móvil encargado de recibir los datos, a 1.2 metros sobre el nivel del suelo y ubicado en un

vehículo donde se hizo el recorrido por las rutas previamente trazadas y mostradas en las figuras 14 y 15, de manera que se cumplieran el rango establecido para cada modelo y además con el protocolo ejecutado por los operadores móviles al momento de realizar los drive test para planificación de sus redes.

La tabla 7, muestra un resumen del esquema de medición llevado a cabo para realizar la toma de muestras (potencia recibida en el móvil), para posteriormente comparar esos datos con los valores obtenidos teóricamente a fin de determinar cuál de los modelos analizados presenta el mejor comportamiento en el escenario de la ciudad de Barranquilla y luego proceder a su ajuste.

Tabla 7. Esquema de medición para la investigación. Fuente: Autor

Parámetro	Selección
Modelos	COST 231-Hata, Walfisch Ikegami y SUI
Zona urbana	Comprendida entre la calle 72 y 74, y entre la carrera 47 y 58
Zona suburbana	Sector de la vía 40 entre calles 75 y avenida Circunvalar
Velocidad del móvil	40 Km/ hora aproximadamente
Sistema de toma de datos	Computador portátil con TEMS Investigation versión 14.2 incorporado, Teléfono Sony Ericsson ARC-S y GPS Royal Tech
Altura de las antenas de transmisión	Rango entre 20 y 40 metros de altura
Altura de la antena de recepción	1.2 metros de altura

Se realizaron 41550 mediciones para el ambiente suburbano y 11565 mediciones para el ambiente urbano. Para determinar la frecuencia de la toma de datos, se utilizó la metodología empleada en (Lecours, Chouinard, & Delisle, 1989). Debe tenerse en cuenta que no fue posible mantener una velocidad fija durante todo el trayecto debido al tráfico vehicular y a la presencia de semaforizaciones.

3.7. PARÁMETROS DE LOS MODELOS EMPLEADOS

De la revisión hecha en el capítulo 2 para consultar que modelos fueron usados en proyectos con fines similares, se encuentra que existen variables o datos cuyo valor puede ser fácilmente determinado ya sea por estar bajo control del experimentador, como por ejemplo la altura de la antena receptora. Otra parte de la información fue proporcionada por el personal encargado de llevar a cabo la toma de muestras (dirigidos por el Ingeniero Jesús Campero Coronado – Gerente para el área de Telecomunicaciones para América Latina de la empresa APPLUS Norcontrol), entre esos tenemos la ubicación de las distintas radiobases y la altura de las antenas transmisoras en cada una de ellas. El TEMS Investigation como ya se mencionó anteriormente, también proporciona alguna información como por ejemplo las coordenadas geográficas de cada punto donde se realizó una medida de potencia o la radiobase de la cual se tomó el dato.

Otros datos son aportados por los mismos modelos cuando se dan ciertas condiciones como ocurre con la ecuación de COST HATA para la variable independiente C_m (ajuste de la altura de la antena receptora) en la que su valor final dependerá del tipo de escenario en el cual se implementa el modelo. La misma situación se observa en el modelo Interino de la Universidad de Stanford en el que algunos valores constantes (a, b y c) dependen del tipo de terreno.

Sin embargo otros datos no pueden ser obtenidos fácilmente. Las ecuaciones 13 y 14, correspondientes a algunos parámetros del modelo Walfisch Ikegami, presentan

algunas variables cuyos valores no pueden ser calculados de manera sencilla. Entre esos tenemos la altura de las edificaciones que rodean a la radiobase, ancho promedio de las calles, distancia entre edificios y ángulo de incidencia.

Investigaciones similares como la de (Ardila, 2012), desarrollaron su propia herramienta, llamada CellGis, para determinar la separación entre obstáculos y la altura promedio de las edificaciones. En otros casos se utilizaron mapas digitales que permiten conocer esa información lo cual permite aumentar los niveles de predicción en las simulaciones (Tahat & Alqudah, 2011).

(Alonso-Quintana & Montejo-Sánchez, 2013) no utilizaron herramientas como las descritas anteriormente. En su caso recurrieron al Reporte Final COST-231 (Directorate-General Information society: Telecommunications, Markets, 1999) en el cual se indica que al desconocerse datos sobre estructura y altura de edificios, y carreteras; se recomiendan valores de:

- $H_{\text{roof}} = 3 \text{ metros} \times (\text{número de pisos}) + \text{altura del tejado}$.
- Altura del tejado (inclinada) = 3 metros.
- Altura azotea (plana) = 0 metros.
- Distancia entre edificios (b) = 20 a 50 metros.
- Ancho de la calle = $b/2$.
- Ángulo de incidencia (θ) = 90°

Para determinar los valores de algunas variables del modelo Walfisch Ikehami para el escenario urbano y suburbano en la ciudad de Barranquilla, se recurrió a las

recomendaciones del Reporte Final COST-231, las cuales también están incluidas en la recomendación UIT-R P.1411-7. En el caso del ambiente urbano se asumió un ancho promedio de calles de 20 metros y distancia entre edificios de 40 metros, así como una altura promedio de 12 metros. Para el ambiente sub-urbano las consideraciones para ancho de las calles fue de 40 metros, distancia entre edificios de 80 metros y altura promedio de edificios de 9 metros.

3.8. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS Y AJUSTE DEL MODELO

La efectividad de cada modelo de propagación ya ha sido validada para los entornos que originalmente fueron considerados, tal como se explicó en el capítulo 2; y aunque son aceptados, también se ha explicado que para escenarios con características distintas a los originales estos modelos generalmente deben ser ajustados.

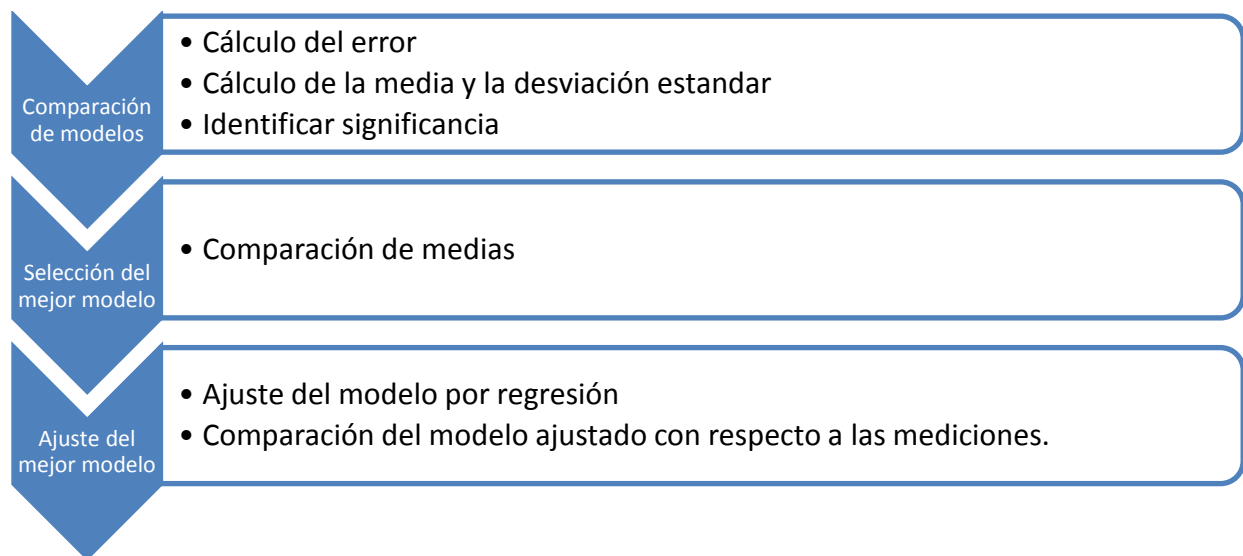


Figura 16. Metodología utilizada para obtener la ecuación del modelo ajustado para el caso estudio. Fuente: Autor.

La figura 16 muestra la metodología empleada en esta investigación para realizar la evaluación de modelos de propagación empíricos en los ambientes urbanos y suburbanos en la ciudad de Barranquilla.

Tal como lo muestra la figura 16, el análisis inicia con la comparación entre las pérdidas de los modelos y también con respecto a las mediciones realizadas en campo. La metodología generalmente empleada en este tipo de investigaciones consiste en calcular la diferencia entre las predicciones y las mediciones con el fin de calcular la media y la desviación estándar. Entre las investigaciones que utilizan tal procedimiento se encuentran las de (Tahat & Alqudah, 2011), (a. Bhuvaneshwari & Sathyasavithri, 2013), (a. Bhuvaneshwari & Sathyasavithri, 2013) (Quintana, 2012) y (Baumgarten et al., 2011).

Para esta investigación se usa el programa Statgraphic, el cual es una herramienta que permite realizar una gran cantidad de procedimientos, entre ellos realizar análisis de datos para calcular la media, desviación estándar, rangos, datos atípicos y normalidad entre otros. La herramienta permite realizar diferentes pruebas basadas en comparación de medias u otro tipo de pruebas para datos no parametrizados.

El procedimiento también permite determinar, con un nivel de confianza del 95%, si los modelos estudiados representan adecuadamente las pérdidas medidas y además cual de esos modelos tiene un nivel de predicción más cercano a los datos reales. Statgraphic permite realizar diferentes pruebas para determinar si existen diferencias

significativas, entre las cuales se encuentran las pruebas de múltiples rangos o la prueba de Kruskal-Wallis.

La ecuación del modelo seleccionado con niveles de predicción más cercanos a las mediciones se somete a un proceso de ajuste. Diferentes metodologías de ajuste pueden ser encontradas en la bibliografía. El tipo de ajuste más común es el de regresión lineal tal como se llevó a cabo en las investigaciones de (Ardila, 2012), (Rozal et al., 2007). Otros métodos también pueden ser utilizados tal como lo recomienda el Ingeniero Andrés Navarro Cadavid, quien al ser consultado sobre las técnicas usadas en su investigación de ajustes de modelos en la ciudad de Cali-Colombia, para realizar el ajuste manifestó que “Para ajustar el modelo se utilizaron mínimos cuadrados para modificar los valores de los parámetros empíricos de los modelos empleados. Estos métodos son bastante tradicionales en la literatura de propagación, aunque existen algunos métodos de regresión no lineal y multivariable que pueden ser más sofisticados y confiables” (N. C. Andrés, comunicación personal, agosto 20 de 2013).

Como resultado del proceso de ajuste se obtiene una ecuación que describe las pérdidas medidas en los escenarios urbanos y suburbanos estudiados en la ciudad de Barranquilla. Este modelo es comparado con los datos medidos para determinar el error y su desviación de manera que el resultado se compara con investigaciones similares.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS COMPARATIVO Y AJUSTE DEL MODELO

Como se explicó en el capítulo 2, los modelos de propagación empíricos son los más abundantes, sin embargo originalmente fueron concebidos para ambientes específicos y con condiciones arquitectónicas distintas a la gran mayoría de ciudades latinoamericanas, lo cual permite inferir diferencias notorias (desde el punto de vista estadístico) entre mediciones reales y cálculos teóricos.

El objetivo general de esta investigación es realizar una comparación entre modelos de pérdidas por trayectoria, por lo que se hace necesario recurrir a procesos estadísticos que permitan determinar cuál de los modelos representa de manera adecuada las mediciones obtenidas en campo con la herramienta TEMS Investigation. Posteriormente se recurrió a técnicas de regresión a fin de ajustar el “mejor” modelo para el caso estudio de manera que se reduzca el error entre mediciones reales y valores obtenidos teóricamente.

El siguiente capítulo presenta todo el proceso estadístico implementado para realizar la comparación de resultados teóricos, descripción del comportamiento de las variables y ajuste del modelo para el ambiente urbano y el ambiente suburbano.

4.1. ANÁLISIS DE MODELOS

Para analizar los modelos de predicción, se realizó una comparación entre las pérdidas por trayectorias calculadas y las pérdidas medidas en cada uno de los ambientes en estudio. Con el fin de comparar entre si los modelos escogidos y los datos obtenidos en las mediciones, se consideraron los rangos comunes de validez mostrados en la tabla 8

Tabla 8: Rango de validez de los modelos para la investigación. Fuente: Autor

Modelo	Frecuencia (MHz)	Altura del transmisor h_T (metros)	Altura del receptor h_R (metros)	Distancia (Km)
COST HATA	1500 -2000	30 - 200	1 -10	1 - 20
Walfisch Ikegami	800 -2000	4 - 50	1 -3	0,2 - 5
SUI	0 - 2000	10 - 80	2 -10	0,1 - 8
<i>Rangos comunes</i>	<i>1500 - 2000</i>	<i>4 - 50</i>	<i>2 - 3</i>	<i>0,2 - 5</i>

Debido a la diferencia entre los rangos de algunos parámetros observados en la tabla 8, es importante resaltar que en muchos casos las ecuaciones de modelos presentan factores de corrección para valores de variables que estén por fuera de las consideraciones iniciales.

La tabla 8 muestra los rangos comunes entre los tres modelos en estudio, las cuales son recomendaciones y no restricciones en cada uno de ellos. Las comparaciones se hicieron teniendo en cuenta el esquema de medición planteado en la tabla 7 y los rangos de validez de la tabla 8.

Algunos ejemplos de valores por fuera de los recomendados pueden ser consultados en la literatura como el caso de (Ardila, 2012) en el cual se ubicó la antena del receptor a una altura de 1.8 metros, lo cual se encuentra por debajo del rango de validez del modelo SUI, observado en la tabla 8.

Otra referencia se encuentra en (a. Bhuvaneshwari & Sathyasavithri, 2013), investigación para la cual se trabajó en la banda de frecuencia de los 900 MHz y altura de la antena del transmisor, en algún caso, de 18 metros; desviándose del rango de validez del modelo COST HATA.

También hay casos donde toman valores de parámetros por fuera del rango recomendado, por ejemplo en (Shittu et al., 2008), en la cual se hace un análisis del modelo HATA en la banda de frecuencia de los 1800 MHz, a pesar que este modelo se recomienda para usarse hasta la banda de los 1500 MHz.

4.2. ANÁLISIS EN EL AMBIENTE SUBURBANO

Para determinar el tipo de prueba estadística a realizar que permita concluir si los modelos seleccionados representan adecuadamente las mediciones realizadas en cada uno de los ambientes, se analizan las pérdidas en cada escenario.

Las tablas 9, 10, 11, 12, 13 y 14; muestran el análisis estadístico llevado a cabo para las mediciones y los cálculos teóricos correspondientes a cada modelo para el ambiente suburbano.

Tabla 9: Resumen estadístico de pérdidas calculadas en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

Recuento	41550
Promedio (dB)	136,307
Desviación Estándar (dB)	9,55922
Coefficiente de Variación	7,01298%
Mínimo (dB)	114,66
Máximo (dB)	160,06
Rango	45,4
Sesgo Estandarizado	-2,58658
Curtosis Estandarizada	-42,2972

Tabla 10: Resumen estadístico de pérdidas calculadas con el modelo COST HATA en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

Recuento	41550
Promedio (dB)	231,859
Desviación Estándar (dB)	27,4696
Coefficiente de Variación	11,8475%
Mínimo (dB)	133,52
Máximo (dB)	278,752
Rango	145,231
Sesgo Estandarizado	-102,45
Curtosis Estandarizada	55,3571

Tabla 11: Resumen estadístico de pérdidas calculadas con el modelo Walfisch Ikegami en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

Recuento	41550
Promedio (dB)	232,888
Desviación Estándar (dB)	12,4251
Coefficiente de Variación	5,33521%
Mínimo (dB)	190,365
Máximo (dB)	254,512
Rango	64,1474
Sesgo Estandarizado	-100,471
Curtosis Estandarizada	52,6584

Tabla 12: Resumen estadístico para cálculos con el modelo SUI tipo A en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

Recuento	41550
Promedio (dB)	235,926
Desviación Estándar (dB)	28,9456
Coefficiente de Variación	12,269%
Mínimo (dB)	132,337
Máximo (dB)	285,217
Rango	152,88
Sesgo Estandarizado	-102,572
Curtosis Estandarizada	55,405

Tabla 13: Resumen estadístico de pérdidas calculadas con el modelo SUI tipo B en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

Recuento	41550
Promedio (dB)	231,859
Desviación Estándar (dB)	27,4696
Coefficiente de Variación	11,8475%
Mínimo (dB)	133,52
Máximo (dB)	278,752
Rango	145,231
Sesgo Estandarizado	-102,45
Curtosis Estandarizada	55,3571

Tabla 14: Resumen estadístico para cálculos con el modelo SUI tipo C en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

Recuento	41550
Promedio (dB)	129,354
Desviación Estándar (dB)	26,5678
Coficiente de Variación	20,5388%
Mínimo (dB)	34,2303
Máximo (dB)	174,757
Rango	140,527
Sesgo Estandarizado	-102,388
Curtosis Estandarizada	55,3315

Las tablas 9 al 14, muestran valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 (correspondientes a la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo), lo cual indica desviaciones significativas de la normalidad tanto para las mediciones como para los cálculos teóricos obtenidos con las ecuaciones de los modelos en estudio, lo que tiende a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor de sesgo estandarizado no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Las figuras 17, 18, 19, 20, 21 y 22; también muestran que no existe una distribución normal de los datos correspondientes a las pérdidas por trayectoria medidas en el ambiente suburbano para las mediciones y para los cálculos teóricos respectivamente.

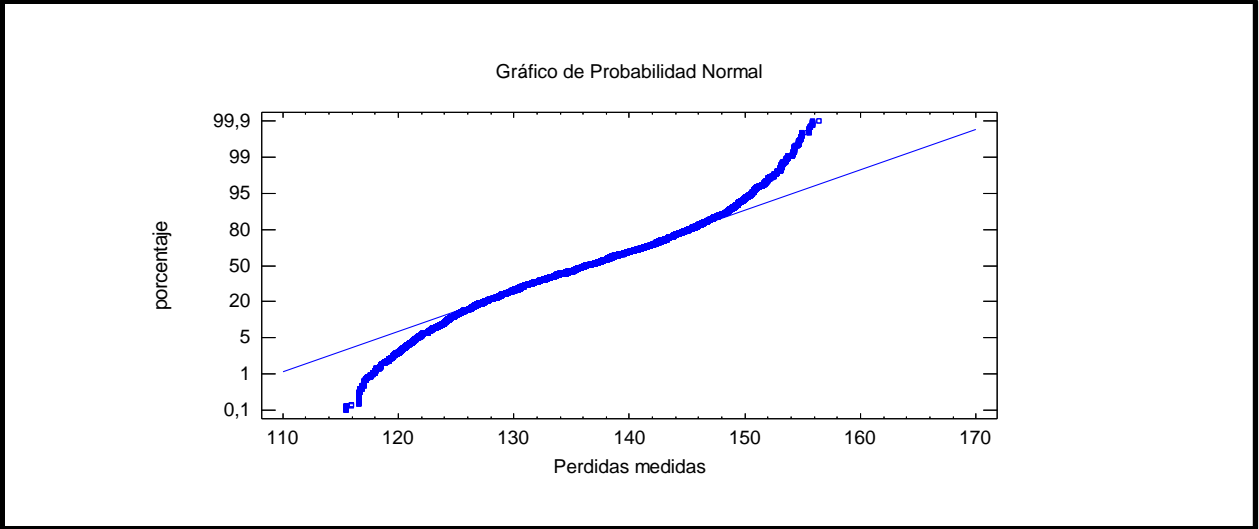


Figura 17: Gráfico de probabilidad normal para pérdidas calculadas en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

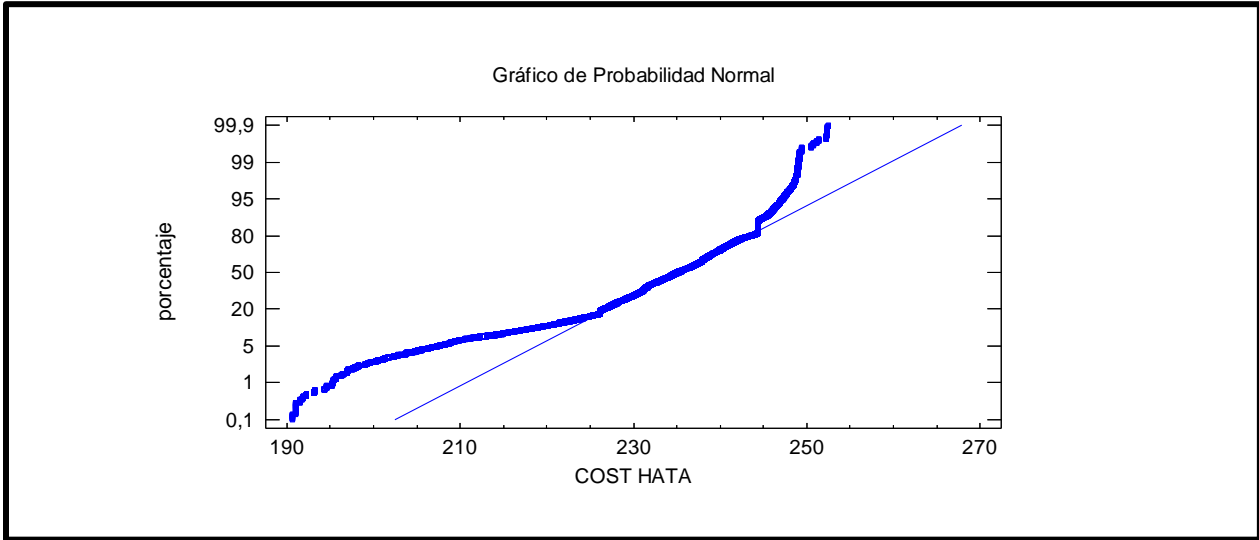


Figura 18: Gráfico de probabilidad normal para modelo COST HATA en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

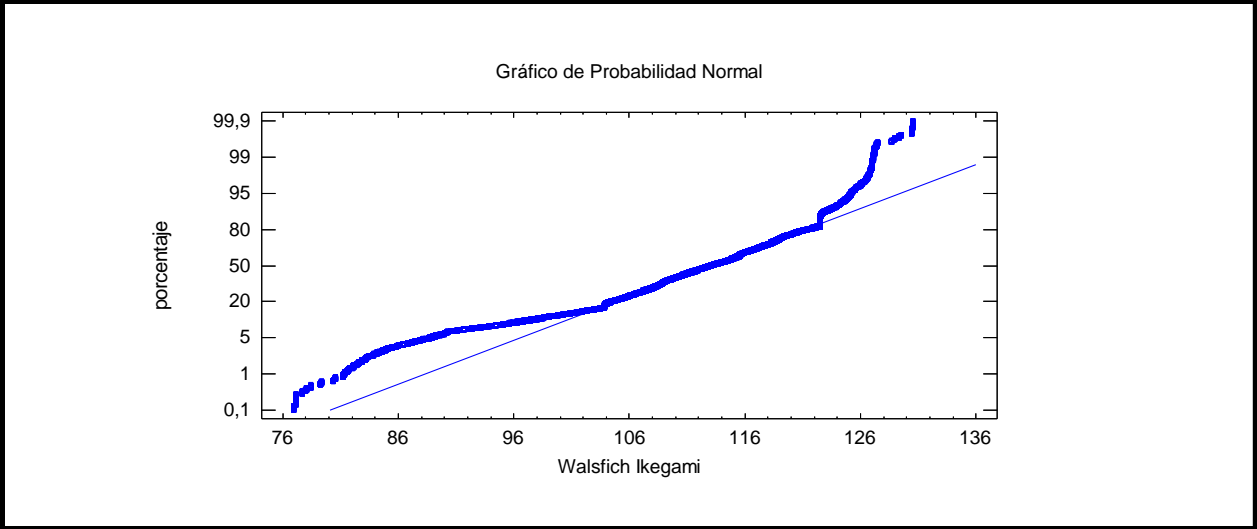


Figura 19: Gráfico de probabilidad normal para modelo Walfisch Ikegami en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

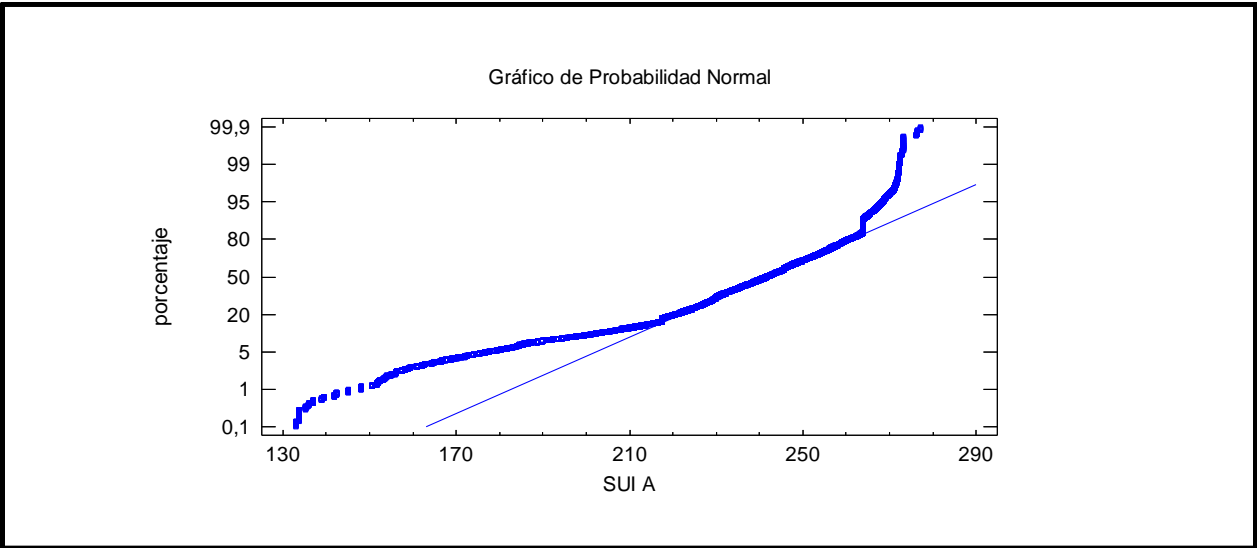


Figura 20: Gráfico de probabilidad normal para modelo SUI tipo A en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

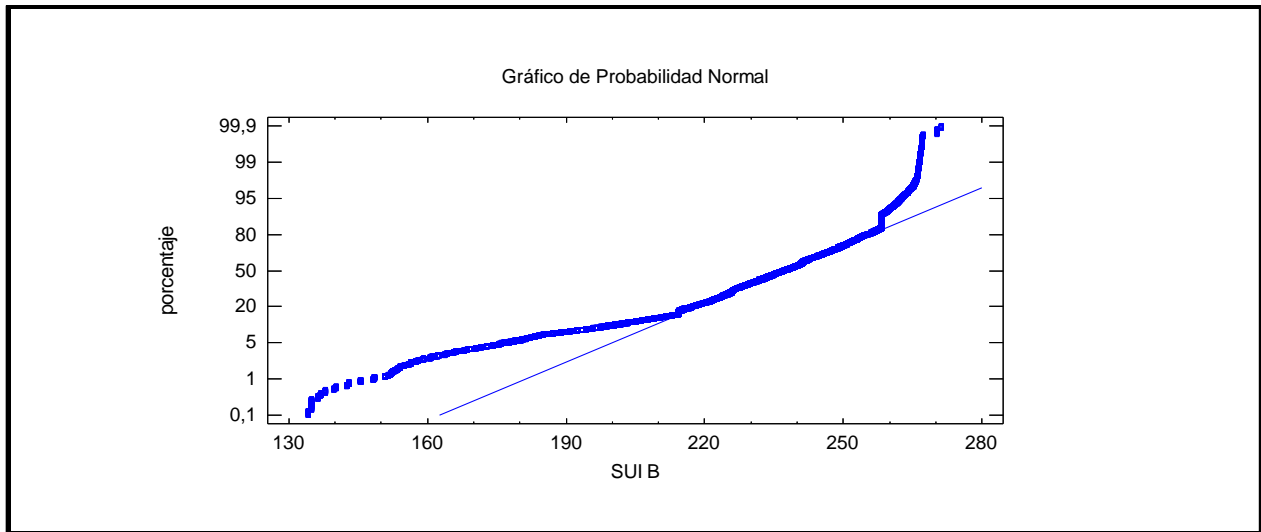


Figura 21: Gráfico de probabilidad normal para modelo SUI tipo B en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

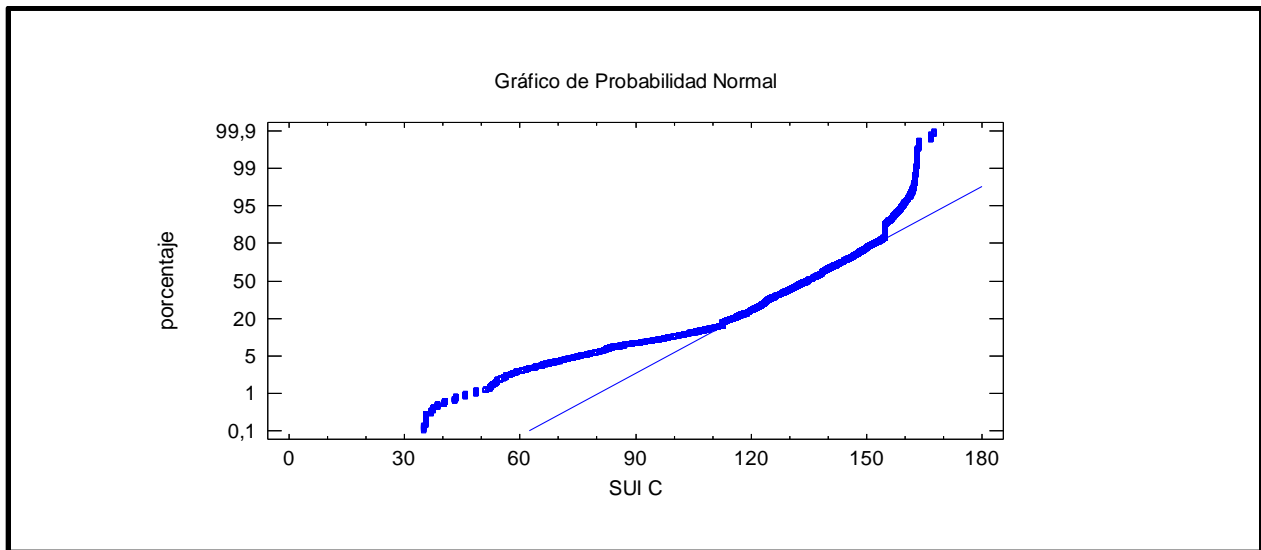


Figura 22: Gráfico de probabilidad normal para modelo SUI tipo C en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

Al no existir una distribución normal, cualquier prueba estadística basada en la desviación estándar, como por ejemplo una ANOVA, queda descartada (Gutierrez & De la Vara, 2008). Por lo tanto se hace necesario el uso de una prueba estadística que no esté basada en la distribución normal de las muestras.

La prueba de Kruskal-Wallis es un método estadístico que se emplea cuando las muestras a comparar no tienen una distribución normal (Montgomery, 2003). La tabla 15 presenta el resultado de la prueba de Kruskal-Wallis que se realizó para determinar si existen diferencias significativas entre las mediciones y las simulaciones.

Tabla 15: Resultado de la prueba de Kruskal-Wallis para mediciones y simulaciones en el ambiente suburbano

Fuente: Autor

	<i>Tamaño de Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
COST HATA	41550	180624,
Perdidas medidas	41550	83615,2
SUI A	41550	193240,
SUI B	41550	186015,
SUI C	41550	73644,4
Walsfich Ikegami	41550	30764,6
Estadístico = 198180, Valor-P = 0,0		

El resultado presentado en la tabla 15 muestra que debido a que el valor-P es menor a 0.05, se puede afirmar con un 95% de confianza que existen diferencias significativas entre las medianas de las muestras (mediciones y cálculos teóricos).

El diagrama de caja y bigote de la figura 23 permite observar que todas las muestras presentan diferencias significativas con respecto a las pérdidas medidas en el ambiente suburbano, siendo el modelo SUI tipo C el que presenta una menor diferencia con respecto a las mediciones realizadas en campo.

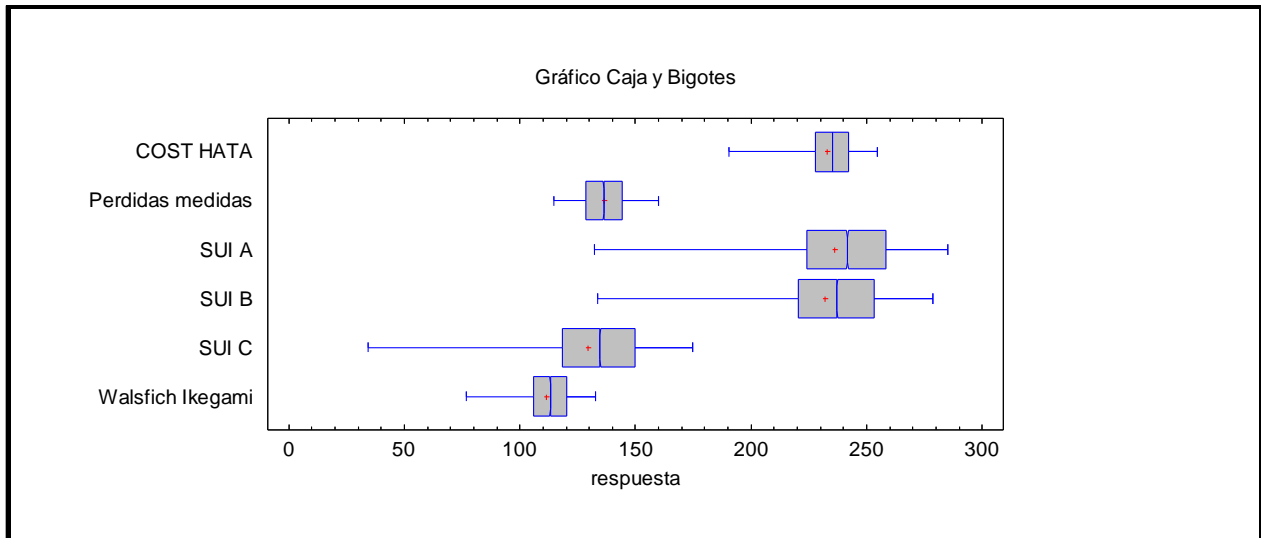


Figura 23: Gráfico de comparación de medias de cada uno de los modelos y de las mediciones en el ambiente suburbano. Fuente: Autor

La gráfica de caja y bigote que resulta al realizar la prueba de Kruskal-Wallis muestra que existen diferencias significativas entre las mediciones y los valores teóricos, lo cual hace necesario el ajuste de la ecuación de manera que el modelo obtenido del proceso de ajuste presente niveles de predicción más cercanos a los valores medidos en campo. Para el caso del ambiente sub-urbano se determinó que el error relativo promedio del modelo SUI-tipo C sin ajustar es de 13.067%. El anexo 4 muestra una gráfica donde con el comportamiento de las pérdidas conforme cambia la distancia en al ambiente sub-urbano.

4.3. ANÁLISIS EN EL AMBIENTE URBANO

Para el ambiente urbano, se aplicó la metodología usada para el ambiente suburbano. En este caso, se consideró desde un inicio todos los tipos de escenario planteados por el modelo SUI.

Las tablas 16, 17, 18, 19, 20 y 21 muestran el análisis estadístico realizado a los valores obtenidos experimentalmente al igual que para los modelos empíricos. Los resultados demuestran que al igual que en el ambiente suburbano, los valores obtenidos en el test de manejo no tienen una distribución normal. Lo mismo ocurre para cada uno de los modelos obtenidos teóricamente.

Tabla 16: Resumen estadístico para pérdidas medidas en el ambiente urbano. Fuente: Autor

Recuento	11565
Promedio (dB)	135,102
Desviación Estándar (dB)	8,64284
Coficiente de Variación	6,39726%
Mínimo (dB)	111,16
Máximo (dB)	151,16
Rango	40,0
Sesgo Estandarizado	-36,1004
Curtosis Estandarizada	4,75038

Tabla 17: Resumen estadístico para cálculos con el modelo COST-HATA en el ambiente urbano. Fuente: Autor

Recuento	11565
Promedio (dB)	229,15
Desviación Estándar (dB)	7,7808
Coficiente de Variación	3,39551%
Mínimo (dB)	200,68
Máximo (dB)	238,522
Rango	37,8422
Sesgo Estandarizado	-73,5086
Curtosis Estandarizada	50,201

Tabla 18: Resumen estadístico para cálculos con el modelo Walfisch Ikegami en el ambiente urbano. Fuente: Autor

Recuento	11565
Promedio (dB)	96,843
Desviación Estándar (dB)	7,25282
Coefficiente de Variación	7,48925%
Mínimo (dB)	74,2286
Máximo (dB)	104,243
Rango	30,0145
Sesgo Estandarizado	-58,5516
Curtosis Estandarizada	16,29

Tabla 19: Resumen estadístico para cálculos con el modelo SUI tipo A en el ambiente urbano. Fuente: Autor

Recuento	11565
Promedio (dB)	174,336
Desviación Estándar (dB)	15,23
Coefficiente de Variación	8,73601%
Mínimo (dB)	121,18
Máximo (dB)	187,578
Rango	66,3985
Sesgo Estandarizado	-69,0204
Curtosis Estandarizada	39,9395

Tabla 20: Resumen estadístico para cálculos con el modelo SUI tipo B en el ambiente urbano. Fuente: Autor

Recuento	11565
Promedio (dB)	170,797
Desviación Estándar (dB)	13,4568
Coefficiente de Variación	7,87886%
Mínimo (dB)	123,554
Máximo (dB)	182,447
Rango	58,8933
Sesgo Estandarizado	-69,7939
Curtosis Estandarizada	41,5923

Tabla 21: Resumen estadístico para cálculos con el modelo SUI tipo C en el ambiente urbano. Fuente: Autor

Recuento	11565
Promedio (dB)	-4,11194
Desviación Estándar (dB)	10,2915
Coefficiente de Variación	-250,283%
Mínimo (dB)	-21,0437
Máximo (dB)	31,4871
Rango	52,5308
Sesgo Estandarizado	58,3135
Curtosis Estandarizada	31,8137

Las figuras 24, 25, 26, 27, 28 y 29; también muestran que no existe una distribución normal de los datos correspondientes a las pérdidas por trayectoria medidas en el ambiente urbano para las mediciones y para los cálculos teóricos en los modelos COST-HATA, WI, SUI tipo A, SUI tipo B y SUI tipo C respectivamente.

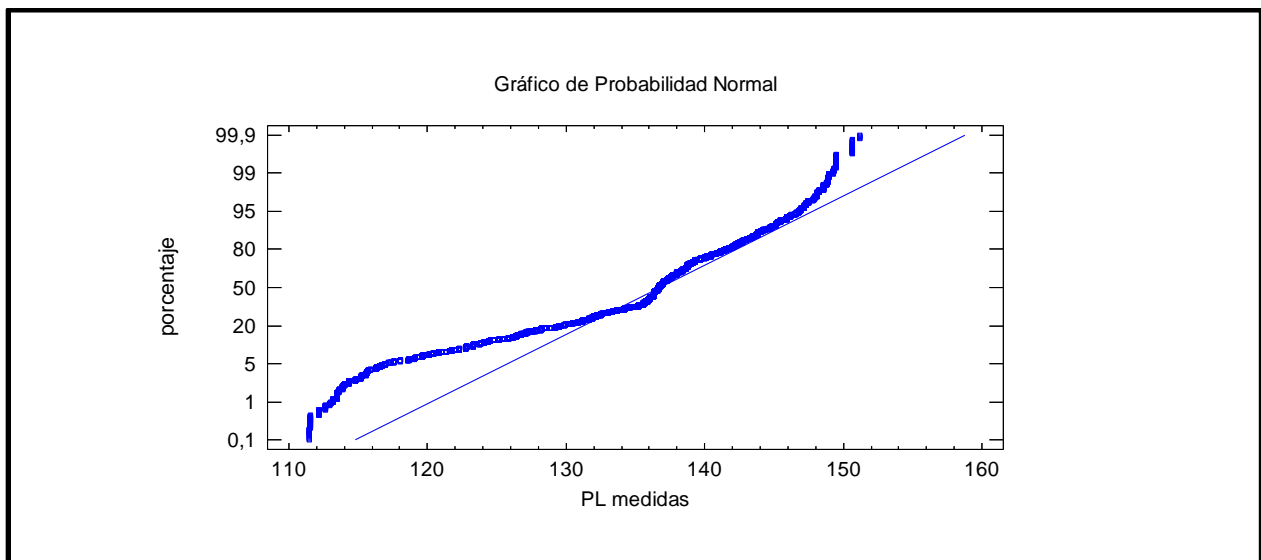


Figura 24: Gráfico de probabilidad normal para pérdidas medidas en el ambiente urbano. Fuente: Autor

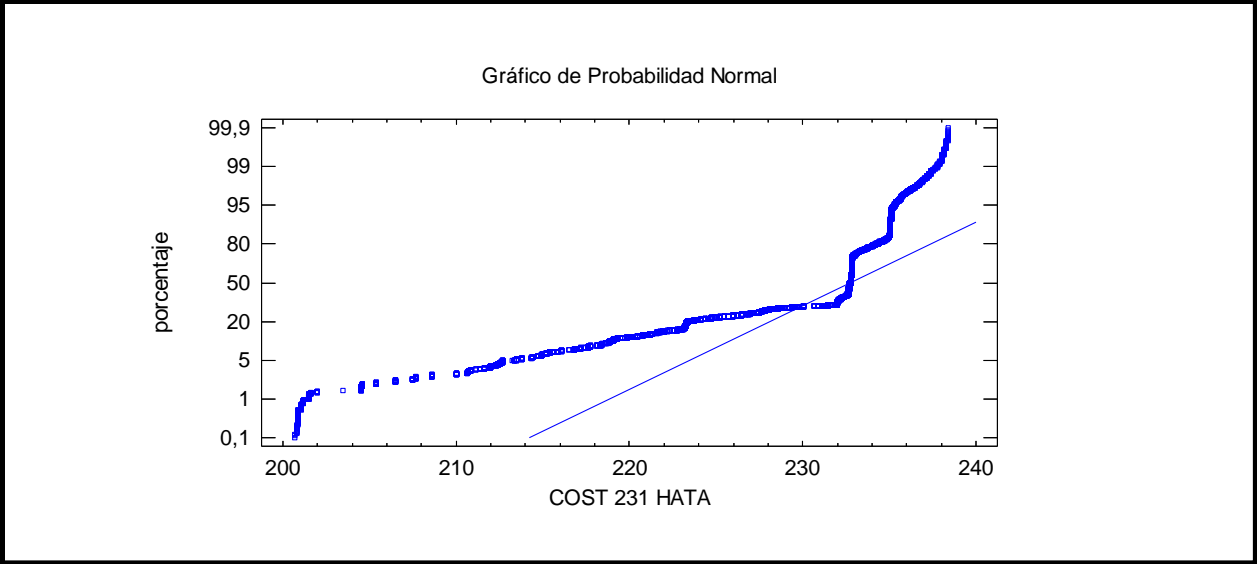


Figura 25: Gráfico de probabilidad normal para modelo COST-HATA en el ambiente urbano. Fuente: Autor

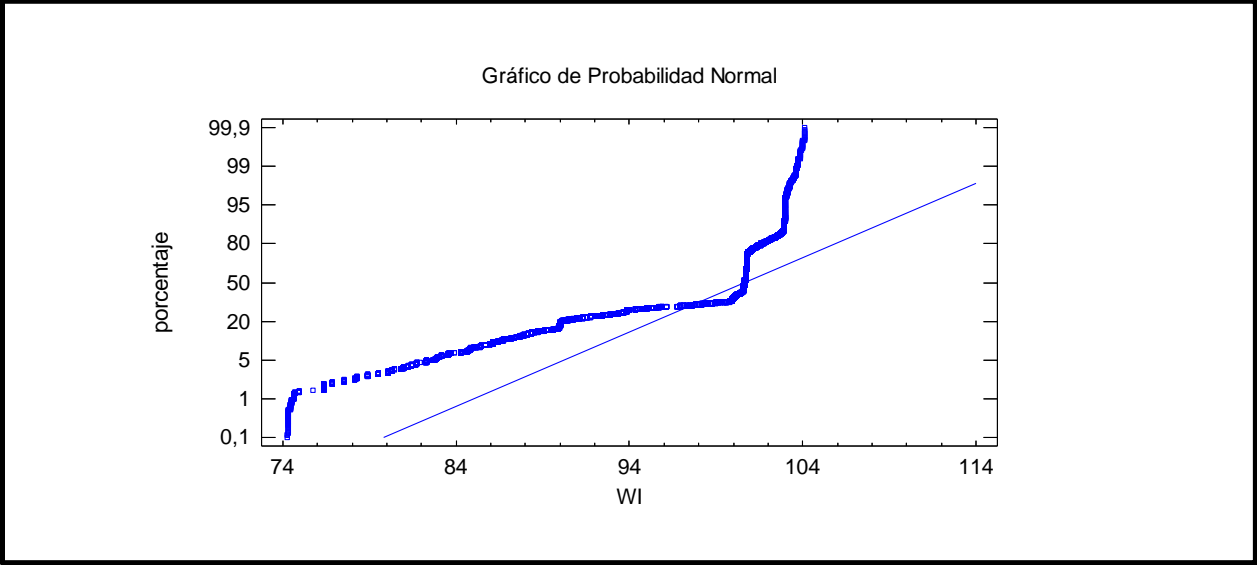


Figura 26: Gráfico de probabilidad normal para modelo Walfisch-Ikegami en el ambiente urbano. Fuente: Autor

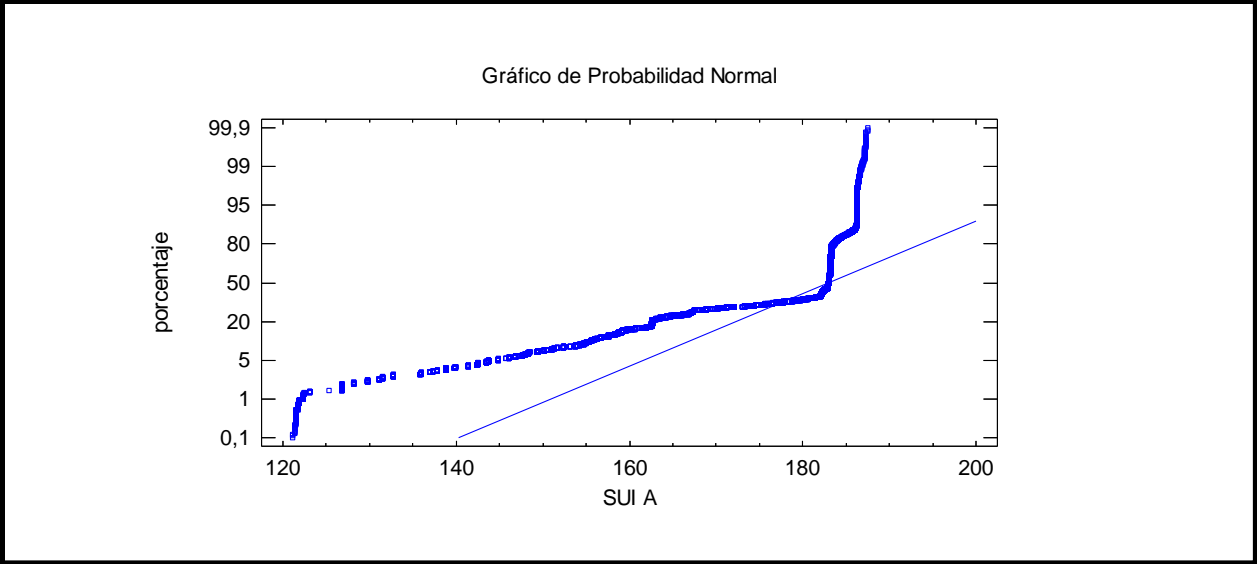


Figura 27: Gráfico de probabilidad normal para modelo SUI tipo A en el ambiente urbano. Fuente: Autor

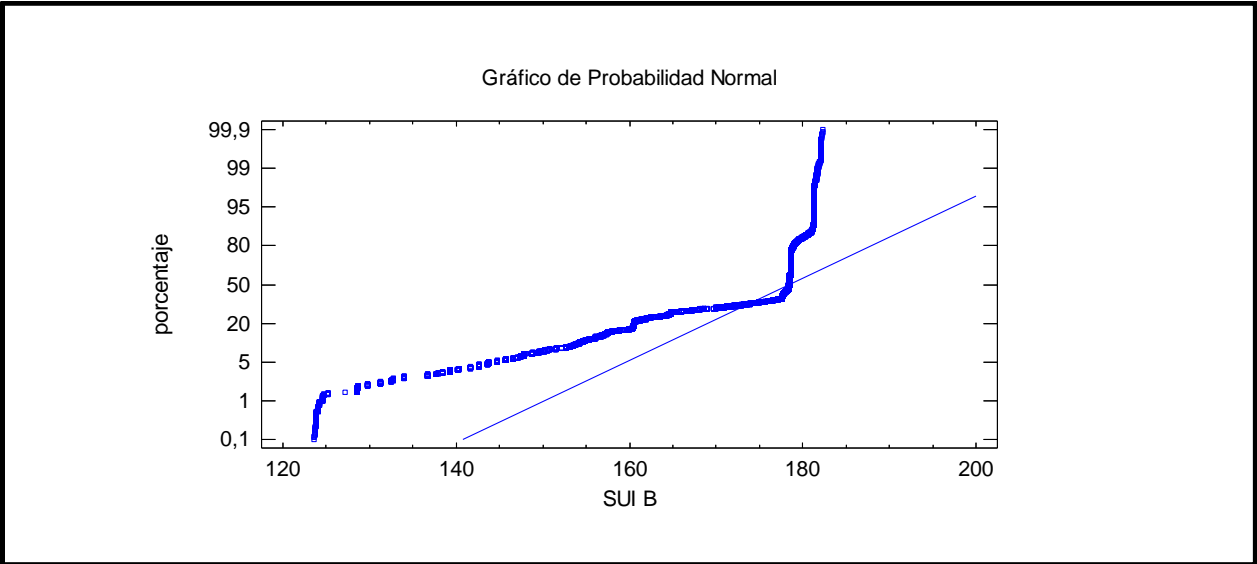


Figura 28: Gráfico de probabilidad normal para modelo SUI tipo B en el ambiente urbano. Fuente: Autor

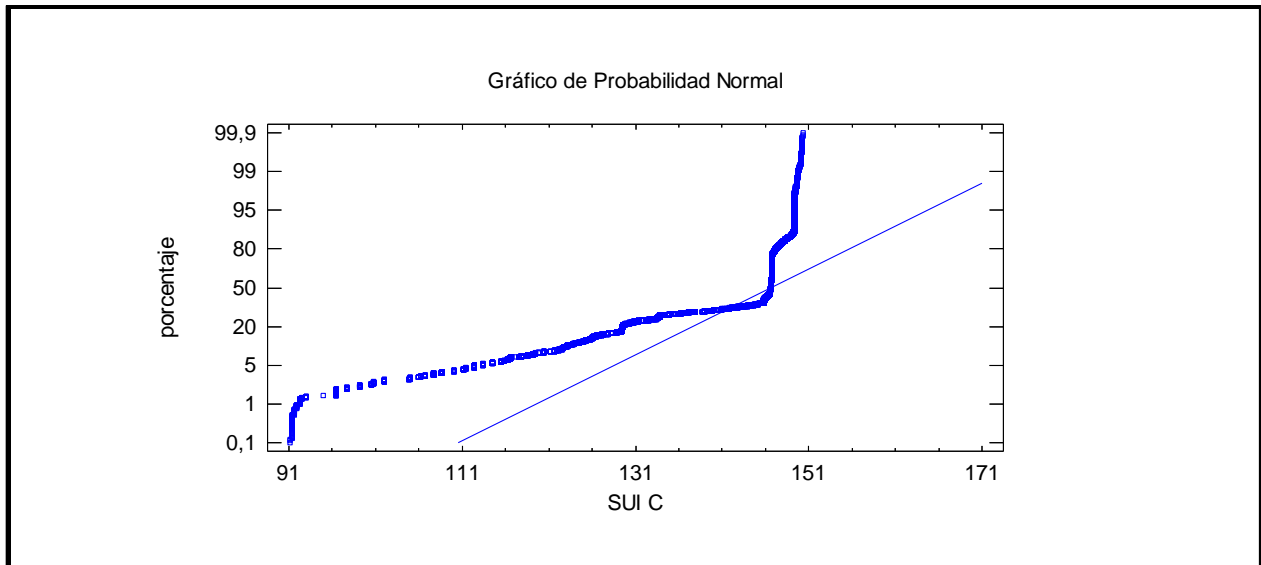


Figura 29: Gráfico de probabilidad normal para modelo SUI tipo C en el ambiente urbano. Fuente: Autor

Prueba de Kruskal-Wallis

	Tamaño de Muestra	Rango Promedio
COST 231 HATA	11565	63608,0
PL medidas	11565	21716,0
SUI A	11565	47645,6
SUI B	11565	42797,3
SUI C	11565	26381,9
WI	11565	6024,23

Estadístico = 61359,6 Valor-P = 0,0

El diagrama de caja y bigote de la figura 30 permite observar que todas las muestras presentan diferencias significativas con respecto a las pérdidas medidas en el ambiente urbano. Al igual que en el ambiente sub-urbano también se puede observar que al incluirse el modelo SUI tipo C (pocas pérdidas) en el análisis comparativo, este presenta un nivel de predicción mucho más cercano a las mediciones que los considerados en un inicio.

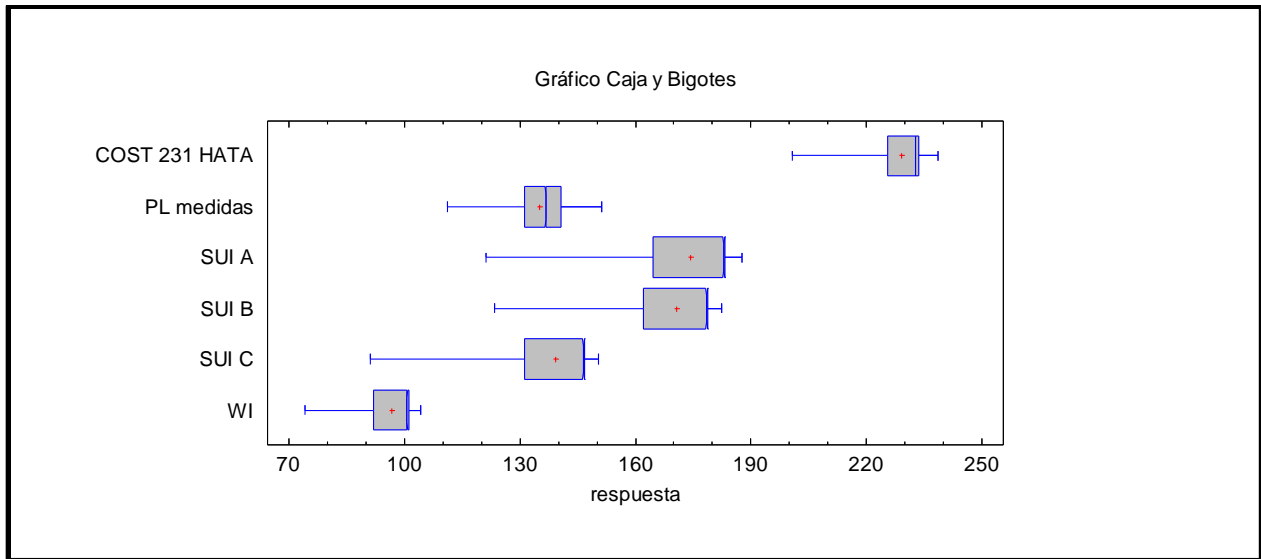


Figura 30: Gráfico de comparación de medias entre cada uno de los y de las mediciones en el ambiente urbano (incluye SUI tipo A y tipo C). Fuente: Autor

La gráfica de caja y bigote que resulta al realizar la prueba de Kruskal-Wallis muestra que existen diferencias significativas entre las mediciones y los valores teóricos, lo cual hace necesario el ajuste de la ecuación de manera que se reduzca el error del mismo, que antes del proceso de ajuste tiene un valor promedio de 8.44%. El anexo 4 muestra una gráfica donde con el comportamiento de las pérdidas conforme cambia la distancia en al ambiente sub-urbano.

4.4. AJUSTE DEL MODELO PARA CADA ESCENARIO

El proceso de comparación entre las pérdidas calculadas a partir de las mediciones de potencia y los valores arrojados por cada uno de los modelos estudiados además de los valores de error relativo promedio obtenidos (13.1% para el modelo SUI-C en el ambiente sub-urbano y 8.4% para el ambiente sub-urbano), permiten determinar que para el caso estudio: Barranquilla, el modelo que presenta los niveles de predicción más altos corresponde al modelo Interino de la Universidad de Stanford tipo C, por lo cual este es seleccionado para ser sometido a un proceso de ajuste que permita un mejor rendimiento en los ambientes urbanos y sub-urbanos seleccionados sin tener que recurrir a mediciones de campo. A continuación se presenta el proceso realizado para obtener una ecuación del modelo ajustado para cada uno de los ambientes seleccionados

4.4.1. Ajuste del modelo Interino de la Universidad de Stanford para el ambiente suburbano

La ecuación para calcular la pérdida de la señal según el modelo de la Universidad de Stanford contiene variables de altura de receptor, longitud de onda, exponente de pérdidas por trayecto y distancia entre la radiobase y el móvil receptor. Otros parámetros de la ecuación se definen como constantes dependiendo el tipo de escenario y se muestran en la tabla 1.

Dado que los valores de longitud de onda, los factores de ajuste (X_f y X_h) y el factor de desvanecimiento (S) permanecen constantes, es posible utilizar un proceso de

regresión no lineal para hallar una nueva ecuación que represente las pérdidas por trayecto en el ambiente suburbano en función del exponente de pérdidas por trayectoria y de la distancia entre estación base y dispositivo receptor.

Este procedimiento consiste en agregar a la hoja de datos de Statgraphic una columna con las pérdidas medidas. También se agrega una columna con los valores calculados del exponente de pérdidas por trayecto de acuerdo a la ecuación (8) y otra columna con la distancia (en metros) entre la radio base y el receptor. Sobre la columna de las mediciones se lleva a cabo el proceso de regresión no lineal, dejando el resto de parámetros constantes. La función a estimar se muestra a continuación en la ecuación 21:

$$P_L = A + (B * \gamma * \log(d/100)) \quad (21)$$

Donde A y B son valores constantes, γ es el exponente de pérdidas por trayecto y d la distancia en metros. Se realiza el proceso de ajuste por regresión no lineal de manera que se relaciona la variable dependiente (P_L) con las variables independientes γ y d a través de la función presentada en la ecuación 21. El resultado de este proceso es una nueva ecuación que describe la relación entre las variables independientes y las pérdidas medidas. El nuevo modelo para el ambiente suburbano en estudio se muestra en la ecuación 22:

$$P_{LS} = 129,193 + (2,4396 * \gamma * \log(d/d_0)) \quad (22)$$

La gráfica de la figura 31 muestra la gráfica resultante del proceso de ajuste contra las pérdidas calculadas a partir de las mediciones. Se puede apreciar un aumento de las pérdidas a medida que aumenta la distancia.

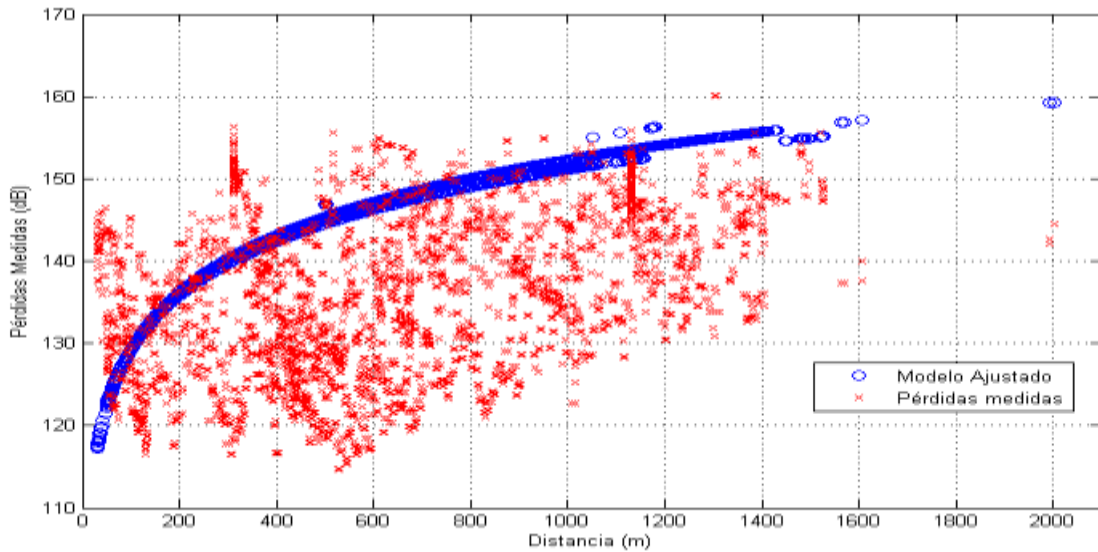


Figura 31. Mediciones vs modelo ajustado en el ambiente suburbano

La gráfica 32 muestra el efecto del exponente de pérdidas por trayectoria sobre las pérdidas en el modelo ajustado. Se observa que las pérdidas aumentan a medida que lo hace el exponente de pérdidas por trayectoria, sin embargo este parámetro no impacta sustancialmente el path loss como si lo hace la distancia.

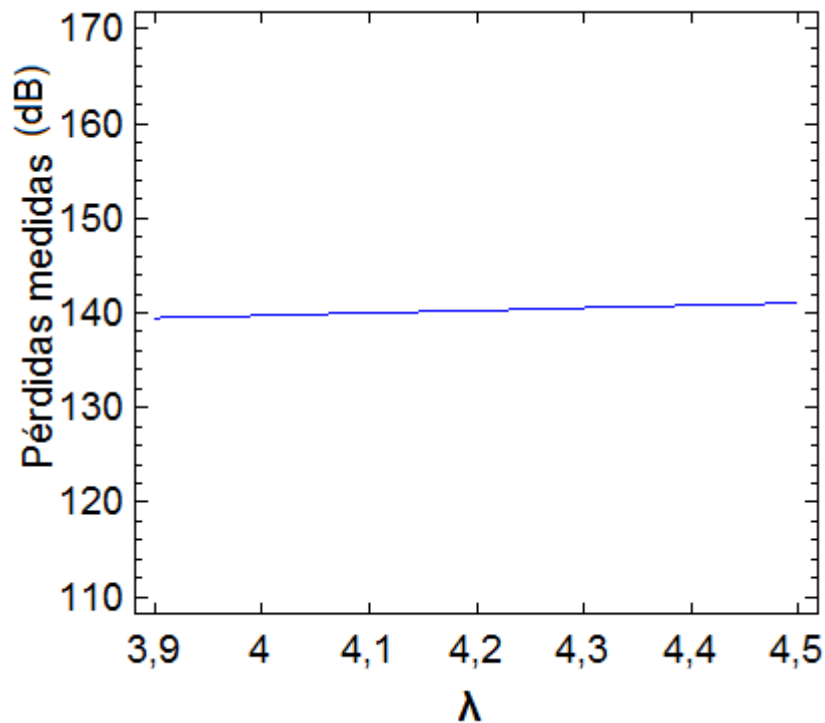


Figura 32. Pérdidas modelo ajustado con respecto al exponente de pérdidas por trayectoria en el ambiente sub-urbano.

Los resultados de la gráfica del modelo ajustado concuerdan con los de investigaciones similares llevadas a cabo en otras ciudades, sin embargo aunque el ajuste mejora los resultados del modelo SUI, lo hace de manera muy discreta ya que el r^2 del nuevo modelo es de tan solo 12,9529%, tal como se muestra en el análisis de varianza de la tabla 22.

Tabla 22. Análisis de varianza para el modelo ajustado del ambiente suburbano

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	7,72479E8	2	3,86239E8
Residuo	3,30491E6	41548	79,5443
Total	7,75784E8	41550	
Total (Corr.)	3,79669E6	41549	

R-Cuadrada = 12,9529 %
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 12,9508 %
Error estándar del est. = 8,91876
Error medio absoluto = 7,52415
Estadístico Durbin-Watson = 0,0072275
Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,996364

Con el fin de ampliar la información de los resultados del proceso de ajuste, se calcula la media y la desviación estándar de las pérdidas medidas, del modelo SUI-C original y del modelo SUI ajustado. Los resultados se muestran en la tabla 23.

Tabla 23. Valores estadísticos para el error en el ambiente suburbano

Error	Media	σ
Modelo original SUI A	-99,6182	27,0759
Modelo original SUI B	-95,5521	25,679
Modelo original SUI C	6,9531	24,8319
Modelo ajustado	-0,0004698	8,91866

El anexo 5 presenta la gráfica de la probabilidad normal del error del modelo ajustado, y las tablas de los anexos 6 y 7 muestran la frecuencia para el error relativo del modelo ajustado. Se puede observar que el 48,18% de los valores calculados con el modelo ajustado se encuentran por debajo del 5% del error relativo, mientras que para el modelo SUI-C sin ajustar este valor disminuye a aproximadamente el 32%.

Como ya se mencionó en el capítulo 3, los escenarios (rurales, urbanos, suburbanos) no presentan uniformidad en todas las ciudades lo cual implica combinación de ambientes, tal como ocurre en el escenario suburbano; en el cual se presentan zonas

con características de tipo rural ya que las construcciones y la arborización son casi nulas o las edificaciones están muy separadas entre sí lo cual disminuye las pérdidas.

La imagen de la figura 33 muestra una foto satelital de las instalaciones del Batallón de Policía Militar ubicado en el sector suburbano donde se realizaron las mediciones. La fotografía muestra amplias zonas sin obstáculos en el margen izquierdo de la avenida, lo cual permite inferir que esta zona tiene una descripción mucho más cercana a la de zona de rural de acuerdo a lo contemplado en la tabla 2.



Figura 33. Imagen satelital sector Batallón de Policía Militar en la vía 40 de Barranquilla. Fuente: Google Earth

El diagrama de caja y bigote de la figura 34 es el resultado de la comparación de medianas que se obtiene al realizar la prueba de Kruskal Wallis para comparar las mediciones con respecto a los modelos en el sector del batallón de Policía militar. La gráfica muestra que en esa zona en específica, el modelo SUI C no presenta diferencia significativa con respecto a las pérdidas medidas, lo cual indica que dicho sector presenta características de pocas pérdidas y que podría considerarse este punto en especial como de tipo rural.

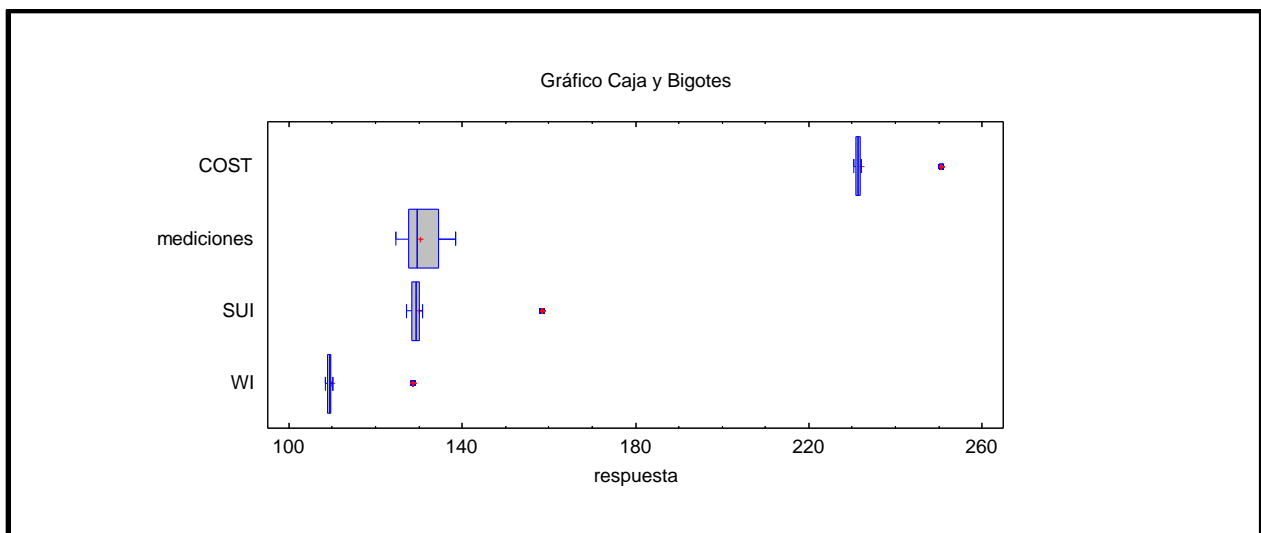


Figura 34. Diagrama de comparación de medianas en entre mediciones y modelos para el sector del Batallón de Policía Militar. Fuente: Autor.

La revisión del estado del arte muestra que la distancia entre transmisor y receptor es una variable común para todos los modelos de propagación empíricos sujetos al análisis, lo cual se debe a que las pérdidas son proporcionales a la distancia. Al utilizar el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para determinar la posición geográfica de cada punto de medición y con respecto a esa información calcular la longitud con respecto a la estación base, se asume la presencia de un error en las coordenadas

geográficas, lo cual está contemplado y aceptado en el funcionamiento del sistema GPS. Dicho error puede ser de hasta 6 metros con respecto a la posición real del equipo y es ocasionado por factores atmosféricos como por ejemplo nubosidad o lluvia, o también por factores técnicos como la diferencia entre los relojes del satélite y del receptor; todo lo anterior puede ocasionar disminución de la precisión del dispositivo (U.S. Government, 2014).

Con el fin de analizar el posible efecto del error en la medida de la distancia entre cada sitio de medida de potencia y la antena de la estación base, se generó una columna con un error aleatorio entre -6 metros y 6 metros; con ese dato se calcularon nuevamente las pérdidas con el modelo SUI (tipo C) original y se determinó el error relativo, el cual varía muy poco hasta llegar a 13.07%. La tabla del anexo 8 muestra un resumen de los resultados obtenidos para el proceso de análisis y ajuste en el ambiente sub-urbano.

4.4.2. Ajuste del modelo Interino de la Universidad de Stanford para el ambiente urbano.

Para el ambiente urbano se realiza el mismo procedimiento llevado a cabo para el escenario suburbano, teniendo en cuenta el análisis comparativo realizado en la primera parte de este capítulo en el cual se determinó que el modelo Interino de la Universidad de Stanford tipo C es el que representa de manera más adecuada a las mediciones en este escenario. Se toman como constantes los mismos parámetros que en el caso suburbano, mientras que la distancia entre transmisor y receptor, y el

exponente de pérdidas por trayectoria se toman como las variables de las cuales dependen las pérdidas por trayectoria.

Debido a que el procedimiento es el mismo para cada escenario, función sobre la cual se realiza la regresión no lineal es la misma mostrada en la ecuación 21. La ecuación resultante del modelo ajustado presenta en la ecuación 23:

$$P_{Lu} = 127,618 + \left(4,11859 * \gamma * \log\left(\frac{d}{100}\right)\right) \quad (23)$$

La gráfica de la figura 35 muestra la gráfica resultante del proceso de ajuste. Nuevamente se puede apreciar un aumento de las pérdidas a medida que aumenta la distancia.

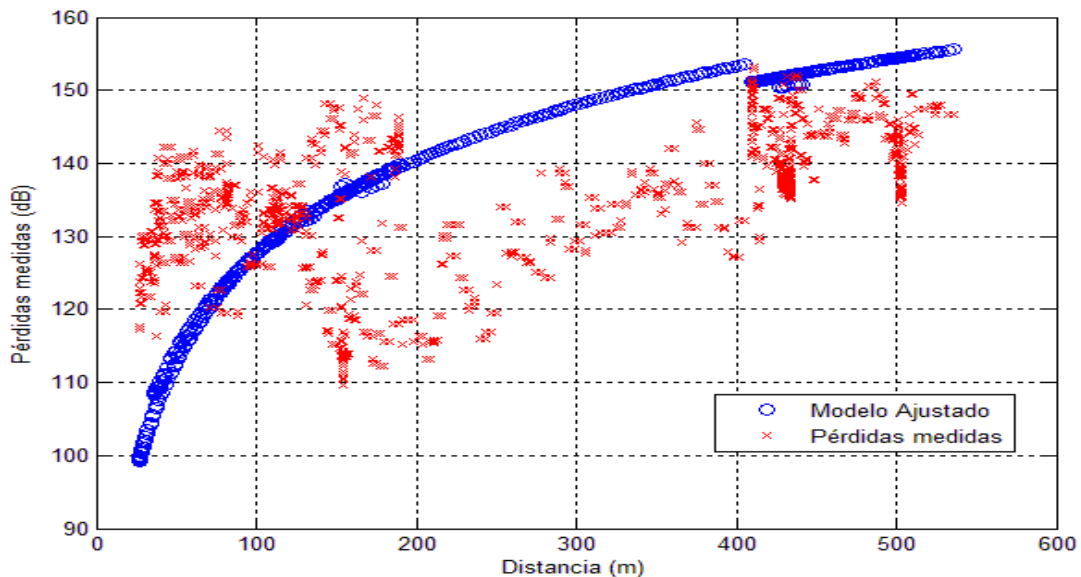


Figura 35. Gráfica del modelo ajustado para el ambiente urbano Vs mediciones

La gráfica 36 muestra el efecto del exponente de pérdidas por trayectoria sobre las pérdidas en el modelo ajustado. Al igual que en el ambiente sub-urbano, se observa

que las pérdidas aumentan a medida que aumenta el exponente de pérdidas por trayectoria, pero no tiene un impacto alto en el resultado de las pérdidas del modelo.

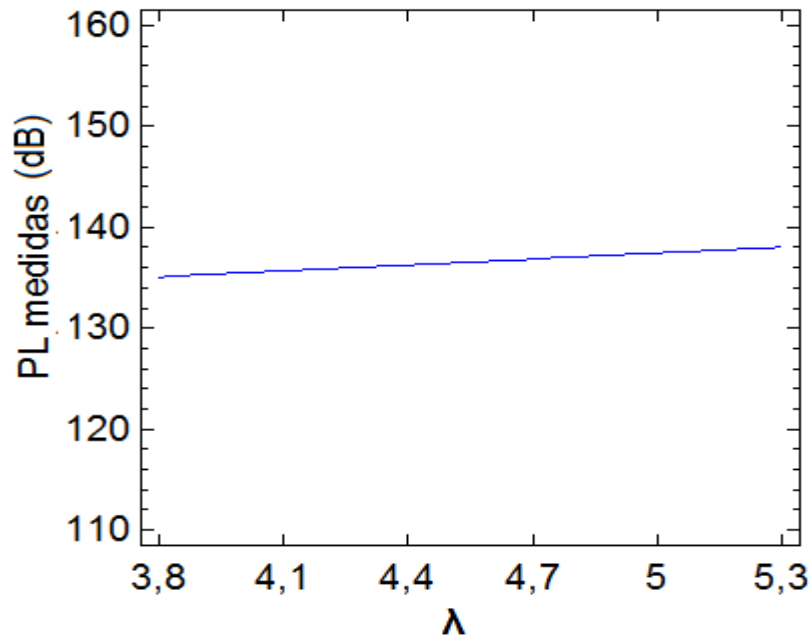


Figura 36. Pérdidas modelo ajustado con respecto al exponente de pérdidas por trayectoria en el ambiente urbano.

Para el caso urbano el proceso de ajuste resulta en un r^2 mucho más alto que para el escenario suburbano, sin embargo sigue resultando bajo y no representa adecuadamente las mediciones en este ambiente. La tabla 24 muestra el análisis de varianza que resulta del proceso de ajuste.

Tabla 24. Análisis de varianza para el modelo ajustado del ambiente urbano

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	2,11439E8	2	1,05719E8
Residuo	516464,	11563	44,6652
Total	2,11955E8	11565	
Total (Corr.)	863815,	11564	

R-Cuadrada = 40,2113 por ciento
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 40,2061 por ciento
Error estándar del est. = 6,68321
Error medio absoluto = 5,00018
Estadístico Durbin-Watson = 0,015476
Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,992133

Con el fin de ampliar la información de los resultados del proceso de ajuste, se calcula la media y la desviación estándar de las pérdidas medidas, del modelo SUI-C original y del modelo SUI ajustado. Los resultados se muestran en la tabla 25.

Tabla 25. Valores estadísticos para el error en el ambiente urbano

Error	Media	σ
Modelo original SUI A	-39,2343	11,6954
Modelo original SUI B	-35,6947	10,3015
Modelo original SUI C	-4,11194	10,2915
Modelo ajustado	0,0000297112	6,68292

En el anexo 9 se muestra el gráfico de la probabilidad de distribución normal para el error del modelo SUI ajustado para el ambiente urbano, y la tabla del anexo 10 y 11 muestran la frecuencia para el error relativo del modelo ajustado. Se puede observar que el 71,08% de los valores calculados con el modelo ajustado se encuentran por debajo del 5% del error relativo, mientras que para el modelo SUI-C sin ajustar este valor disminuye a aproximadamente el 30,42%.

Para mirar el efecto del error de la distancia en el ambiente urbano, se recurrió al mismo procedimiento llevado a cabo en el ambiente urbano. En este caso el error relativo del modelo SUI C con respecto a las pérdidas calculadas baja de 8.44% a 7.21%, lo cual demuestra que el error en el sistema de posicionamiento puede llegar a afectar considerablemente la efectividad del modelo.

El anexo 12 muestra un resumen de los resultados obtenidos en el proceso de análisis y de ajuste para el escenario urbano.

Conclusiones

Los escenarios estudiados no presentan uniformidad en sus construcciones, lo que permite que sean considerados totalmente como urbanos o suburbanos de acuerdo a la clasificación presentada en la tabla 2. En cada uno de los ambientes seleccionados se identifican variaciones con respecto a la definición propuesta por el Reporte Final 231 o por la recomendación de UIT. En el caso del ambiente suburbano se identifican amplias zonas donde no existen construcciones de ningún tipo a lado y lado de la vía principal y además con poca presencia de obstáculos como árboles, lo cual cambia las consideraciones de propagación.

También en el caso suburbano se observa que no existen “cañones urbanos”, es decir largas hileras de edificios con construcciones de varios pisos y además de altura uniforme en promedio. Tampoco existe uniformidad en la distancia que hay entre edificios a lado y lado de la vía principal de la zona donde se tomaron las medidas de potencia. Lo anterior afecta la efectividad del modelo Walfisch Ikegami, ya que este contempla escenarios con una arquitectura de estructuras con consideraciones de altura y distancia casi constantes, lo cual no ocurre en los sectores contemplados para en el caso estudio.

Ninguno de los modelos analizados en esta investigación representa adecuadamente las mediciones efectuadas en cada uno de los ambientes para redes HSPA+ en la banda de los 1900 MHz, siendo el COST 231 HATA el de peor rendimiento para cada

caso. Para el escenario urbano y para el escenario suburbano, el modelo Interino de la Universidad de Stanford configurado para terrenos tipo C presenta niveles de predicción más altos en comparación con los otros estudiados, aun cuando se compara como lo demuestra la prueba de Kruskal-Wallis realizada en cada caso.

En lo que respecta al modelo ajustado para el ambiente suburbano, se puede concluir que se mejoran los niveles de predicción con respecto a los modelos originales lo cual puede observarse en la tabla 23 donde la media del error tiende a cero y la desviación estándar difiere de los modelos sin ajustar, lo cual tiene similitud con investigaciones similares.

Con los resultados obtenidos en el ambiente suburbano, se logra una mejora respecto a los modelos originales y además muestran una tendencia parecida a investigaciones del mismo tipo. Se debe hacer claridad que el modelo ajustado para el ambiente suburbano no logra representar a la mayoría de las pérdidas calculadas a partir de las mediciones de potencia.

Aunque pueden existir diferentes fuentes de error, entre las más notorias se encuentra la diferencia entre los tipos de ambiente para los cuales fueron diseñados originalmente cada modelo y el caso estudio. Además como se mencionó en el capítulo 4, se observa que para el ambiente suburbano escogido, para llevar a cabo esta investigación existen combinaciones de escenarios entre suburbano y rural; lo cual dificulta el análisis ya que los modelos empíricos seleccionados para esta investigación, aunque contemplan

casos urbanos y suburbanos, no presentan la posibilidad de escenarios combinados como es el caso que se presenta en la zona de la vía 40 en Barranquilla.

Con respecto al ambiente urbano, los resultados son mejores que en el escenario suburbano, ya que el r^2 es más alto, lo cual indica que en este caso se representan mucho mejor a las mediciones obtenidas. Sin embargo tampoco se logra obtener un modelo que represente más del 90% de las pérdidas calculadas a partir de las mediciones de potencia.

Al hacer una comparación con los resultados de investigaciones similares, se puede concluir que en los modelos obtenidos mediante el proceso de ajuste -para el caso estudio Barranquilla y en redes HSPA+ en la banda de los 1900 MHz- las pérdidas por trayectoria aumentan en forma proporcional a la distancia entre la estación base y el equipo móvil receptor, y que además la diferencia entre los entornos para los cuales fueron diseñados originalmente los modelos y los escenarios en los cuales se desarrolló la investigación, provoca diferencias significativas que finalmente se ven reflejadas en los bajos niveles de r^2 resultantes.

En lo que respecta al exponente de pérdidas por trayectoria, a medida que este aumenta también lo hacen las pérdidas por trayectoria (λ) en el modelo ajustado para cada uno de los ambientes. Sin embargo las figuras 32 y 36 muestran que las pérdidas en el modelo ajustado no son altamente sensibles al λ como sí lo son a la distancia.

Otro aspecto que podría ayudar a tener más claridad en los resultados sería el uso de sistemas de corrección para reducir el error del cálculo de la posición geográfica entregada por el equipo de posicionamiento global, de manera que el dato de distancia entre estación base y móvil sea más exacto, lo cual finalmente impacta los niveles de predicción del modelo SUI – Tipo C original. Como se puede observar en el análisis correspondiente, al generar errores aleatorios en la distancia determinada por las coordenadas entregadas por el GPS y al calcular las pérdidas del modelo SUI-Tipo C tomando en cuenta ese error, hay variaciones en el error relativo determinado para el modelo con respecto a las pérdidas obtenidas a partir de las mediciones realizadas en cada escenario.

Para el caso estudio, la altura de la antena del receptor considerada estuvo fija en 1.2 metros por lo cual no se conoce el impacto que tendría la variación de esta altura sobre los niveles de predicción de cada uno de los modelos; lo cual podría ser objeto de estudio en investigaciones futuras.

Otras variables sobre las cuales se podría tener control con el fin de tener unos resultados más completos son la posición y la altura de las estaciones base con el fin de mirar el impacto en los niveles de predicción de cada modelo, sin embargo para esto se hace necesaria la colaboración de alguno de los operadores de telefonía móvil con presencia en la ciudad de Barranquilla.

El uso de mapas digitales y bases de datos cartográficas permitiría tener resultados mucho más concluyentes con respecto a la efectividad del modelo Walfisch Ikegami, ya que al no tener datos exactos como ancho de las calles y distancia entre edificios, el nivel de predicción se ve afectado al usar valores que aunque se encuentran en las recomendaciones de la UIT y del Reporte Final COST-231, no son los reales.

También podría pensarse que este tipo de trabajo sea el inicio para el diseño de un sistema de medición y de un protocolo para realizar Drive Test, con el que se puedan obtener de manera confiable los datos necesarios para el análisis de propagación de señales inalámbricas, lo cual podría ayudar a reducir los costos, reducir los errores y tendría como resultado el aumento de estudios similares para las ciudades colombianas.

Finalmente con miras a ampliar este trabajo se recomienda a futuros investigadores del área, el desarrollo de un modelo de propagación que tenga en cuenta mediciones en toda la ciudad de Barranquilla de manera que se contemplen sus distintos entornos de propagación además de sus características urbanísticas específicas, las cuales difieren notablemente de los entornos de ciudades de Estados Unidos y Japón para los cuales la mayoría de los modelos estudiados fueron creados originalmente. Teniendo en cuenta que las estadísticas muestran que el estándar LTE-A será la tecnología predominante en el mercado de datos móviles durante la próxima década, se recomienda realizar futuras mediciones en redes que soporten dicha tecnología.

REFERENCIAS

- 4G Americas. (2013). HSPA y HSPA+. Retrieved March 1, 2015, from <http://www.4gamericas.org/es/resources/technology-education/hspa-and-hspa/>
- Alcaldía de Barranquilla. (2010). Información general. Retrieved March 1, 2013, from http://www.barranquilla.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=28&Itemid=119
- Alonso-Quintana, R., & Montejo-Sánchez, S. (2013). Estudio comparativo de los modelos de propagación de canal inalámbrico. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática Y Comunicaciones (RIELAC)*, 34, 12–26.
- Ardila, C. A. (2012). Ajuste estadístico de modelos de propagación de señal usando medidas de la ciudad de Cali, 6, 1–8.
- Ariza, L. C. (2012). Estudio de propagación de una red DTV terrestre bajo el estandar DVB-T con recepción fija y móvil en el escenario metropolitano de la ciudad de Bogotá D.C., Colombia.
- Barclay, L. W. (1988). The need for propagation studies. *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers*, 58(6), S135. doi:10.1049/jjere.1988.0050
- Baumgarten, J., Chee, K. L., Hecker, A., Thomas, K., Braun, M., Zahn, P., & Ag, L. S. (2011). Performance of Prediction Models in Suburban / Rural Residential Areas At 860 , 2300 and 3500 MHz, 1412–1416.
- Bhuvaneshwari, a., & Sathyasavithri, T. (2013). Comparative analysis of mobile radio path loss models for suburban environment in Southern India. *2013 International Conference on Emerging Trends in VLSI, Embedded System, Nano Electronics and Telecommunication System (ICEVENT)*, (I), 1–5. doi:10.1109/ICEVENT.2013.6496544
- Bhuvaneshwari, A., Hemalatha, R., & Satyasavithri, T. (2013). Development of an Empirical Power model and Path Loss Investigations for Dense Urban Region in, (November), 500–505.
- Blaunstein, N., & Christodoulou, C. (2007a). *Radio propagation and adaptative antennas for wireless communications* (Primera Ed.). New Jersey: Wiley.
- Blaunstein, N., & Christodoulou, C. (2007b). *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links* (Primera ed.). New Jersey: Wiley.
- Chebil, J., Lwas, A. K., Islam, M. R., & Zyoud, A.-H. (2011). Comparison of empirical propagation path loss models for mobile communications in the suburban area of

Kuala Lumpur. *2011 4th International Conference on Mechatronics (ICOM)*, (May), 1–5. doi:10.1109/ICOM.2011.5937144

Directorate-General Information society: Telecommunications, Markets, T.-I. and E. of R. (1999). *COST Action 231 - Final report*.

DU, K.-L., & Swamy, M. (2010). *Wireless Communication Systems* (Primera ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Egli, J. J. (1957). Radio Propagation above 40 MC over Irregular Terrain. *Proceedings of the IRE*, 45. doi:10.1109/JRPROC.1957.278224

Erceg, V., Member, S., Greenstein, L. J., Tjandra, S. Y., Parkoff, S. R., Gupta, A., ... Bianchi, R. (1999). An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments. *Ieee Journal on Selected Areas in Communications*, 17(7), 1205–1211. doi:10.1109/49.778178

Ericsson. (2013). Las ondas de radio y la salud: Estaciones base. Estocolmo. Retrieved from <http://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/corporate-responsibility/2012/es-radio-waves-and-health-base-stations-2013.pdf>

Ericsson. (2014a). suscripciones de servicios móviles a nivel mundial. Retrieved February 1, 2015, from https://www.flickr.com/photos/ericsson_images/15192684513/in/set-157649326666221

Ericsson. (2014b). suscripciones en diferentes tecnologías inalámbricas. Retrieved February 1, 2014, from <https://www.ericsson.com/TET/trafficView/loadBasicEditor.ericsson>

Friis, H. (1946). Simple Transmission Formula. *Proceedings of the IRE and Waves and Electrons May*, (1), 254–256. doi:10.1109/JRPROC.1946.234568

Garcia-Alvarez, J.-C., & Rogriguez, O.-A. (2002). Desempeño de Modelos de Propagación en Comunicación Móvil para la zona de Caldas Parte 1: Modelos para áreas urbanas. *X Congreso Internacional de Telecomunicaciones*.

GSMA. (2015). HSPA. Retrieved February 25, 2015, from <http://www.gsma.com/aboutus/gsm-technology/hspa>

Gutierrez, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (Segunda Ed.). Mexico D. F.: McGraw-Hill Interamericana.

Hapsari, W. a., Umesh, A., Iwamura, M., Tomala, M., Gyula, B., & Sébire, B. (2012). Minimization of drive tests solution in 3GPP. *IEEE Communications Magazine*, 50(June), 28–36. doi:10.1109/MCOM.2012.6211483

- Hata, M. (1980). Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 29(3), 317–325. doi:10.1109/TVT.1980.23859
- Itu-R. (2008). Report ITU-R M.2134 Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s).
- ITU-R. (2013a). Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones de exteriores de corto alcance y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz Serie P, 7. Retrieved from http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-7-201309-!!!PDF-S.pdf
- ITU-R. (2013b). *Focus on international regulations for spectrum management and satellite orbits*. Retrieved from http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/48-es.aspx#.VNpGL_mG-8A
- Lecours, M., Chouinard, J.-Y., & Delisle, G. (1989). Statistical Modeling of the Received Signal Envelope in a Mobile Radio Channel, 37(3), 204–212.
- Mejia, D., & Ardila, C. (2009). Some comparison between propagation models in Cali Reference Scenario, 2–5.
- MinTIC. (2014a). Total de suscriptores de internet fijo en Colombia. Retrieved from <http://colombiatic.mintic.gov.co/estadisticas/stats.php?id=48&pres=content>
- MinTIC. (2014b). Total Internet móvil en Colombia. Retrieved February 1, 2015, from <http://colombiatic.mintic.gov.co/estadisticas/stats.php?id=14>
- Montgomery, D. (2003). *Diseño y Análisis de Experimentos*. (Limusa Wiley, Ed.) (2a ed.). Mexico D. F.
- Navarro, A., & Ardila, C. (2012). Statistical adjustment of empirical propagation path loss models to the COST 2100 Cali reference scenario. *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 1–2. doi:10.1109/APS.2012.6348047
- Palacio, J. P. Sentencia T-397/14 (2014). Bogotá: Corte Constitucional de Colombia.
- Phillips, C., Sicker, D., & Grunwald, D. (2013). A Survey of Wireless Path Loss Prediction and Coverage Mapping Methods. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1), 255–270. doi:10.1109/SURV.2012.022412.00172
- Quintana, R. A. (2012). Evaluación de modelos de propagación de canal inalámbrico, 1(lii), 53–62.

- Rappaport, T. S. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice* (Segunda ed.). Editorial Prentice Hall.
- Rozal, E. O., Pelaes, E. G., Ufpa, P., & Pará, B. (2007). Statistical Adjustment of Walfisch-Ikegami Model based in Urban Propagation Measurements, 584–588.
- Salazar-palma, M., & Bonneau, R. J. (2003). A survey of various propagation models for mobile communication. *Antennas and Propagation Magazine*, 45, 239–307. Retrieved from Base de datos de IEEE
- Shittu, W. a., Bajoga, B. G., Anwar, F., & Salami, M. J. E. (2008). Prediction of received signal power and propagation path loss in open/rural environments using modified Free-Space loss and Hata models. *2008 IEEE International RF and Microwave Conference*, 126–130. doi:10.1109/RFM.2008.4897406
- Tahat, A. a, & Alqudah, Y. a. (2011). Analysis of propagation models at 2.1 GHz for simulation of a live 3G cellular network. *2011 Wireless Advanced*, 164–169. doi:10.1109/WiAd.2011.5983305
- Tapia, P., Liu, J., Karimli, Y., & Feuerstein, M. J. (2009). *HSPA Performance and Evolution*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/9780470742068
- U.S. Government. (2014). GPS Accuracy. Retrieved June 24, 2015, from <http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>

ANEXOS



a)



b)

Anexo 1. Ejemplos de cambio de altura de edificaciones en una misma hilera para el ambiente urbano. Fuente: Google Street View.

**Multi-band F-Panel
Dual Polarization
Half-power Beam Width
Adjust. Electrical Downtilt**
set by hand or by optional RCU (Remote Control Unit)

1710-2200
X
65°
0°-10°

KATHREIN
Antennen · Electronic

XPol F-Panel 1710-2200 65° 18dBi 0°-10°T

Type No.	742 215		
Frequency range	1710 - 1880 MHz	1850 - 1990 MHz	1920 - 2200 MHz
Polarization	+45°, -45°	+45°, -45°	+45°, -45°
Gain	2 x 17.7 dBi	2 x 17.9 dBi	2 x 18 dBi
Half-power beam width Copol. +45°/-45°	Horizontal: 67° Vertical: 6.8°	Horizontal: 66° Vertical: 6.5°	Horizontal: 65° Vertical: 6.2°
Electrical tilt continuously adjustable	0°-10°	0°-10°	0°-10°
Vertical Pattern - sidelobe suppression for first sidelobe above main beam	0° .. 4° .. 8° .. 10° T 18 .. 17 .. 17 .. 17 dB	0° .. 4° .. 8° .. 10° T 18 .. 18 .. 17 .. 17 dB	0° .. 4° .. 8° .. 10° T 18 .. 18 .. 17 .. 18 dB
Front-to-back ratio (180° ± 30°)	Copol. > 30 dB Total power: > 25 dB	Copol. > 30 dB Total power: > 25 dB	Copol. > 30 dB Total power: > 25 dB
Cross polar ratio Main direction Sector	0° ±90°	Typically: 25 dB > 10 dB	Typically: 25 dB > 10 dB
Isolation, between ports	> 30 dB	> 30 dB	> 30 dB
Impedance	50 Ω	50 Ω	50 Ω
VSWR	< 1.5	< 1.5	< 1.5
Intermodulation IM3 (2 x 43 dBm carrier)	< -150 dBc		
Max. power per input	300 W (at 50 °C ambient temperature)		

1710 - 1880 MHz: +45°/-45° Polarization



Horizontal Pattern



Vertical Pattern
0°-10° electrical downtilt

1850 - 1990 MHz: +45°/-45° Polarization



Horizontal Pattern



Vertical Pattern
0°-10° electrical downtilt

1920 - 2200 MHz: +45°/-45° Polarization



Horizontal Pattern



Vertical Pattern
0°-10° electrical downtilt



Mechanical specifications

Input	2 x 7-16 female
Connector position	Bottom
Adjustment mechanism	1x, Position bottom continuously adjustable
Weight	7.5 kg
Wind load	Frontal: 130 N (at 150 km/h) Lateral: 110 N (at 150 km/h) Rearside: 310 N (at 150 km/h)
Max. wind velocity	260 km/h
Packing size	1574 x 172 x 90 mm
Height x width x depth	1302 / 155 / 66 mm

065 2316 Suppl. to antenna

Internet: <http://www.kathrein.de>

KATHREIN-Werke KG · Anton-Kathrein-Strasse 1 - 3 · P.O. Box 10 04 44 · 83004 Rosenheim · Germany · Phone +49 8031 186-0 · Fax +49 8031 186-494

742 215 Page 1 of 3

Accessories (order separately)

Type No.	Description	Remarks	Material	Weight approx.	Units per antenna
734 300	2 clamps	Max: 34 – 60 mm dia.	Stainless steel	60 g	1
734 301	2 clamps	Max: 60 – 80 mm dia.	Stainless steel	70 g	1
734 302	2 clamps	Max: 80 – 100 mm dia.	Stainless steel	80 g	1
734 303	2 clamps	Max: 100 – 120 mm dia.	Stainless steel	90 g	1
734 304	2 clamps	Max: 120 – 140 mm dia.	Stainless steel	110 g	1
734 305	2 clamps	Max: 45 – 125 mm dia.	Stainless steel	80 g	1
736 546	1 clamp	Max: 50 – 115 mm dia.	Hot-dip galvanized steel	1,0 kg	2
850 10002	1 clamp	Max: 110 – 220 mm dia.	Hot-dip galvanized steel	2,7 kg	2
850 10003	1 clamp	Max: 210 – 380 mm dia.	Hot-dip galvanized steel	4,8 kg	2
732 317	1 downfit kit	Downfit angle: 0° – 10°	Stainless steel	1,0 kg	1

For downfit mounting use the clamps for an appropriate mast diameter together with the downfit kit. Wall mounting: No additional mounting kit needed.

Material: Reflector screen: Tin plated copper. Radiator: Tin plated zinc. Flat fiberglass radome: The max. radome depth is only 60 mm. Fiberglass material guarantees optimum performance with regards to stability, stiffness, UV resistance and painting. The colour of the radome is grey. All screws and nuts: Stainless steel.

Grounding: The metal parts of the antenna including the mounting kit and the inner conductors are DC grounded.

Environmental conditions: Kathrein cellular antennas are designed to operate under the environmental conditions as described in ETS 300 019-1-4 class 4.1 E. The antennas exceed this standard with regard to the following items:
- Low temperature: -55 °C
- High temperature (dry): +60 °C

Ice protection: Due to the very sturdy antenna construction and the protection of the radiating system by the radome, the antenna remains operational even under icy conditions.

Environmental tests: Kathrein antennas have passed environmental tests as recommended in ETS 300 019-2-4. The homogeneous design of Kathrein's antenna families use identical modules and materials. Extensive tests have been performed on typical samples and modules.

Please note: As a result of more stringent legal regulations and judgements regarding product liability, we are obliged to point out certain risks that may arise when products are used under extraordinary operating conditions.

The mechanical design is based on the environmental conditions as stipulated in ETS 300 019-1-4, which includes the static mechanical load imposed on an antenna by wind at maximum velocity. Extraordinary operating conditions, such as heavy icing or exceptional dynamic stress (e.g. strain caused by oscillating support structures), may result in the breakage of an antenna or even cause it to fall to the ground. These facts must be considered during the site planning process.

The installation team must be properly qualified and also be familiar with the relevant national safety regulations.

The details given in our data sheets have to be followed carefully when installing the antennas and accessories.

The limits for the coupling torque of RF-connectors, recommended by the connector manufacturers must be obeyed.

Any previous datasheet issues have now become invalid.



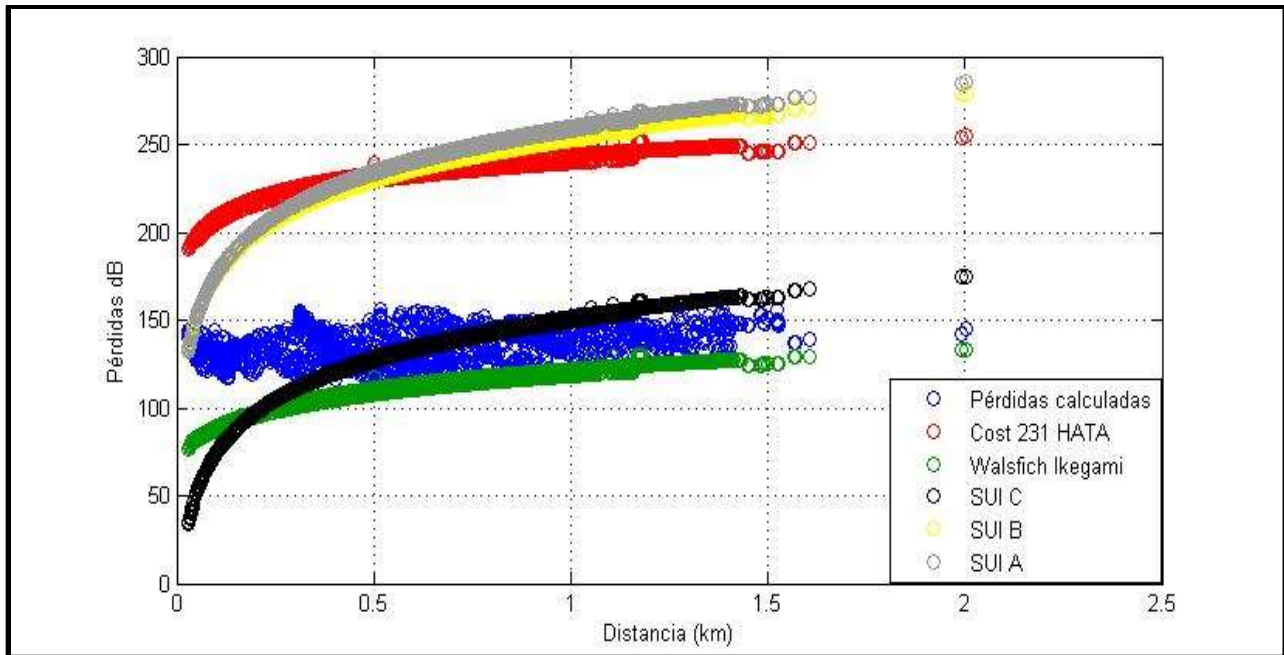
850.0214c Subject to alteration.



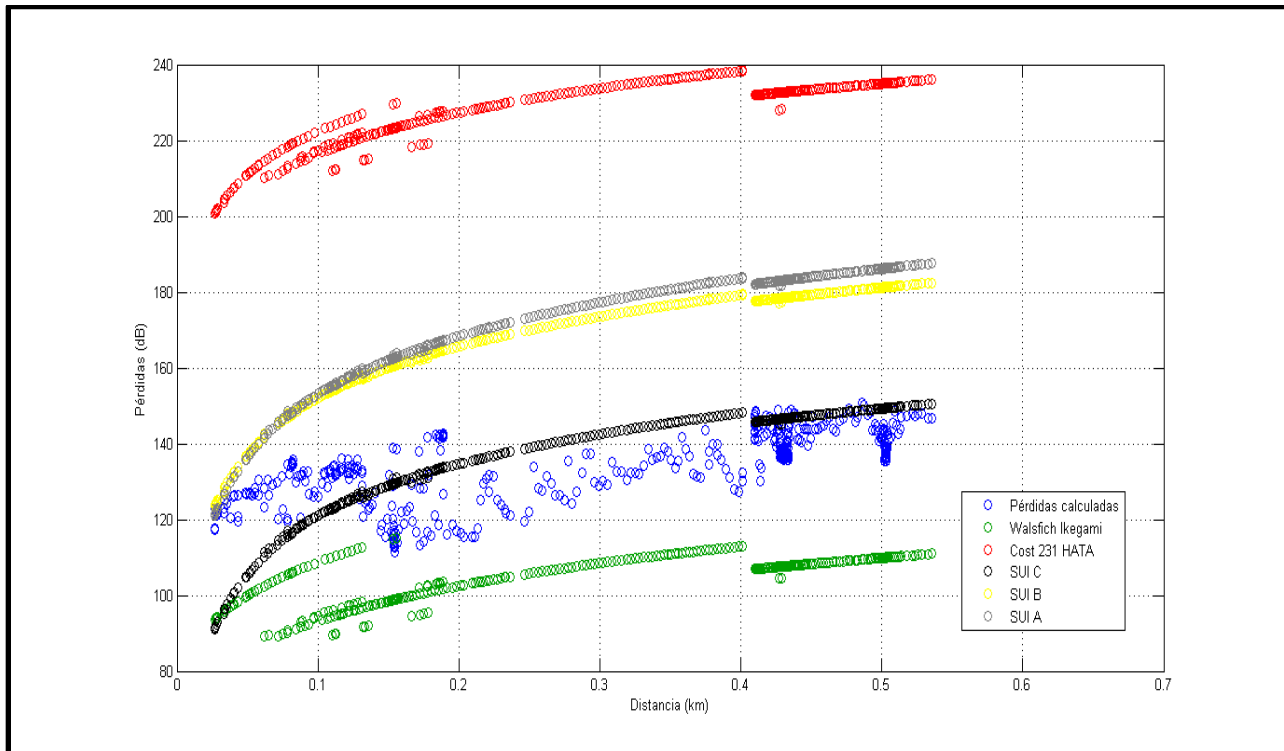
a)



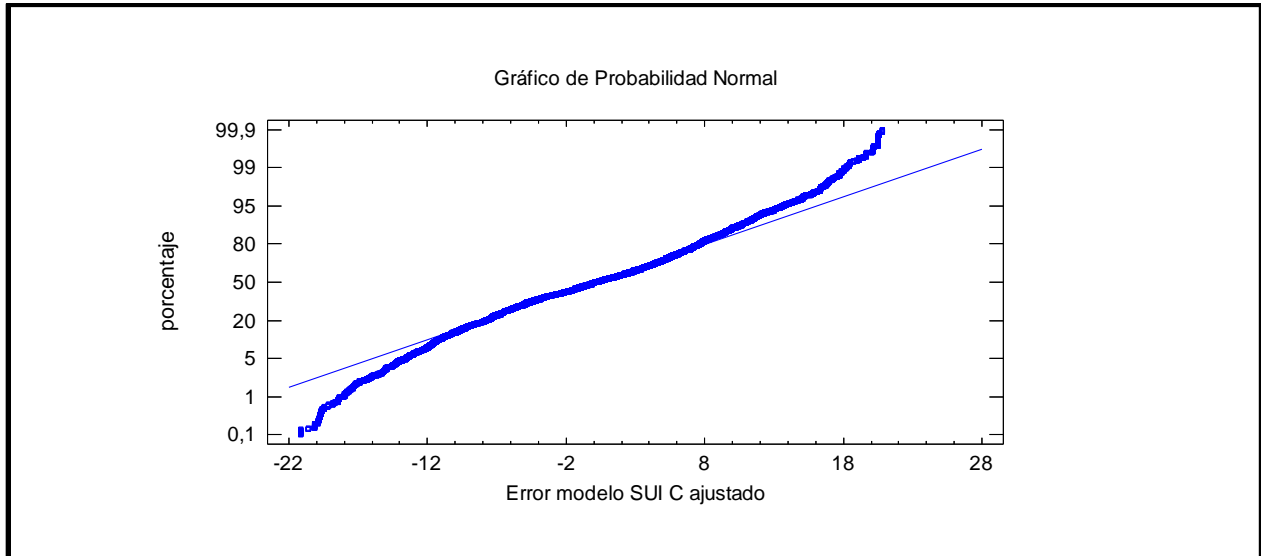
Anexo 3 ubicación de la estaciones bases. a) Escenario urbano, b) Escenario suburbano. Fuente: Google Earth.



Anexo 4: Pérdidas calculadas vs pérdidas para cada modelo en el ambiente sub-urbano.



Anexo 5: Pérdidas calculadas vs pérdidas para cada modelo en el ambiente sub-urbano.



Anexo 6: Gráfico de probabilidad normal para el error del modelo ajustado en el ambiente suburbano

Anexo 7: Tabla de Frecuencias para error relativo modelo ajustado ambiente suburbano

	<i>Límite</i>	<i>Límite</i>			<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia</i>
<i>Clase</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>	<i>Punto Medio</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Relativa</i>	<i>Acumulada</i>	<i>Rel. Acum.</i>
	menor o igual	0,0		0	0,0000	0	0,0000
1	0,0	0,153333	0,0766667	670	0,0161	670	0,0161
2	0,153333	0,306667	0,23	622	0,0150	1292	0,0311
3	0,306667	0,46	0,383333	493	0,0119	1785	0,0430
4	0,46	0,613333	0,536667	630	0,0152	2415	0,0581
5	0,613333	0,766667	0,69	609	0,0147	3024	0,0728
6	0,766667	0,92	0,843333	575	0,0138	3599	0,0866
7	0,92	1,07333	0,996667	544	0,0131	4143	0,0997
8	1,07333	1,22667	1,15	640	0,0154	4783	0,1151
9	1,22667	1,38	1,30333	648	0,0156	5431	0,1307
10	1,38	1,53333	1,45667	411	0,0099	5842	0,1406
11	1,53333	1,68667	1,61	629	0,0151	6471	0,1557
12	1,68667	1,84	1,76333	513	0,0123	6984	0,1681
13	1,84	1,99333	1,91667	506	0,0122	7490	0,1803
14	1,99333	2,14667	2,07	687	0,0165	8177	0,1968
15	2,14667	2,3	2,22333	459	0,0110	8636	0,2078
16	2,3	2,45333	2,37667	557	0,0134	9193	0,2213
17	2,45333	2,60667	2,53	626	0,0151	9819	0,2363
18	2,60667	2,76	2,68333	599	0,0144	10418	0,2507
19	2,76	2,91333	2,83667	629	0,0151	11047	0,2659
20	2,91333	3,06667	2,99	715	0,0172	11762	0,2831
21	3,06667	3,22	3,14333	516	0,0124	12278	0,2955
22	3,22	3,37333	3,29667	695	0,0167	12973	0,3122
23	3,37333	3,52667	3,45	731	0,0176	13704	0,3298
24	3,52667	3,68	3,60333	695	0,0167	14399	0,3465
25	3,68	3,83333	3,75667	941	0,0226	15340	0,3692

26	3,83333	3,98667	3,91	561	0,0135	15901	0,3827
27	3,98667	4,14	4,06333	571	0,0137	16472	0,3964
28	4,14	4,29333	4,21667	688	0,0166	17160	0,4130
29	4,29333	4,44667	4,37	740	0,0178	17900	0,4308
30	4,44667	4,6	4,52333	510	0,0123	18410	0,4431
31	4,6	4,75333	4,67667	709	0,0171	19119	0,4601
32	4,75333	4,90667	4,83	900	0,0217	20019	0,4818
33	4,90667	5,06	4,98333	758	0,0182	20777	0,5000
34	5,06	5,21333	5,13667	781	0,0188	21558	0,5188
35	5,21333	5,36667	5,29	756	0,0182	22314	0,5370
36	5,36667	5,52	5,44333	650	0,0156	22964	0,5527
37	5,52	5,67333	5,59667	747	0,0180	23711	0,5707
38	5,67333	5,82667	5,75	438	0,0105	24149	0,5812
39	5,82667	5,98	5,90333	759	0,0183	24908	0,5995
40	5,98	6,13333	6,05667	637	0,0153	25545	0,6148
41	6,13333	6,28667	6,21	524	0,0126	26069	0,6274
42	6,28667	6,44	6,36333	481	0,0116	26550	0,6390
43	6,44	6,59333	6,51667	482	0,0116	27032	0,6506
44	6,59333	6,74667	6,67	538	0,0129	27570	0,6635
45	6,74667	6,9	6,82333	374	0,0090	27944	0,6725
46	6,9	7,05333	6,97667	501	0,0121	28445	0,6846
47	7,05333	7,20667	7,13	449	0,0108	28894	0,6954
48	7,20667	7,36	7,28333	658	0,0158	29552	0,7112
49	7,36	7,51333	7,43667	384	0,0092	29936	0,7205
50	7,51333	7,66667	7,59	560	0,0135	30496	0,7340
51	7,66667	7,82	7,74333	517	0,0124	31013	0,7464
52	7,82	7,97333	7,89667	524	0,0126	31537	0,7590
53	7,97333	8,12667	8,05	216	0,0052	31753	0,7642
54	8,12667	8,28	8,20333	373	0,0090	32126	0,7732
55	8,28	8,43333	8,35667	437	0,0105	32563	0,7837
56	8,43333	8,58667	8,51	312	0,0075	32875	0,7912
57	8,58667	8,74	8,66333	324	0,0078	33199	0,7990
58	8,74	8,89333	8,81667	394	0,0095	33593	0,8085
59	8,89333	9,04667	8,97	454	0,0109	34047	0,8194
60	9,04667	9,2	9,12333	437	0,0105	34484	0,8299
61	9,2	9,35333	9,27667	204	0,0049	34688	0,8348
62	9,35333	9,50667	9,43	470	0,0113	35158	0,8462
63	9,50667	9,66	9,58333	258	0,0062	35416	0,8524
64	9,66	9,81333	9,73667	340	0,0082	35756	0,8606
65	9,81333	9,96667	9,89	337	0,0081	36093	0,8687
66	9,96667	10,12	10,0433	214	0,0052	36307	0,8738
67	10,12	10,2733	10,1967	266	0,0064	36573	0,8802
68	10,2733	10,4267	10,35	191	0,0046	36764	0,8848
69	10,4267	10,58	10,5033	225	0,0054	36989	0,8902
70	10,58	10,7333	10,6567	323	0,0078	37312	0,8980
71	10,7333	10,8867	10,81	258	0,0062	37570	0,9042
72	10,8867	11,04	10,9633	336	0,0081	37906	0,9123
73	11,04	11,1933	11,1167	194	0,0047	38100	0,9170
74	11,1933	11,3467	11,27	224	0,0054	38324	0,9224
75	11,3467	11,5	11,4233	124	0,0030	38448	0,9253
76	11,5	11,6533	11,5767	293	0,0071	38741	0,9324
77	11,6533	11,8067	11,73	213	0,0051	38954	0,9375
78	11,8067	11,96	11,8833	171	0,0041	39125	0,9416
79	11,96	12,1133	12,0367	158	0,0038	39283	0,9454
80	12,1133	12,2667	12,19	163	0,0039	39446	0,9494
81	12,2667	12,42	12,3433	258	0,0062	39704	0,9556
82	12,42	12,5733	12,4967	171	0,0041	39875	0,9597
83	12,5733	12,7267	12,65	84	0,0020	39959	0,9617

84	12,7267	12,88	12,8033	51	0,0012	40010	0,9629
85	12,88	13,0333	12,9567	101	0,0024	40111	0,9654
86	13,0333	13,1867	13,11	24	0,0006	40135	0,9659
87	13,1867	13,34	13,2633	155	0,0037	40290	0,9697
88	13,34	13,4933	13,4167	129	0,0031	40419	0,9728
89	13,4933	13,6467	13,57	53	0,0013	40472	0,9741
90	13,6467	13,8	13,7233	29	0,0007	40501	0,9748
91	13,8	13,9533	13,8767	41	0,0010	40542	0,9757
92	13,9533	14,1067	14,03	50	0,0012	40592	0,9769
93	14,1067	14,26	14,1833	49	0,0012	40641	0,9781
94	14,26	14,4133	14,3367	125	0,0030	40766	0,9811
95	14,4133	14,5667	14,49	84	0,0020	40850	0,9832
96	14,5667	14,72	14,6433	38	0,0009	40888	0,9841
97	14,72	14,8733	14,7967	76	0,0018	40964	0,9859
98	14,8733	15,0267	14,95	53	0,0013	41017	0,9872
99	15,0267	15,18	15,1033	84	0,0020	41101	0,9892
100	15,18	15,3333	15,2567	29	0,0007	41130	0,9899
101	15,3333	15,4867	15,41	32	0,0008	41162	0,9907
102	15,4867	15,64	15,5633	38	0,0009	41200	0,9916
103	15,64	15,7933	15,7167	48	0,0012	41248	0,9927
104	15,7933	15,9467	15,87	2	0,0000	41250	0,9928
105	15,9467	16,1	16,0233	28	0,0007	41278	0,9935
106	16,1	16,2533	16,1767	0	0,0000	41278	0,9935
107	16,2533	16,4067	16,33	34	0,0008	41312	0,9943
108	16,4067	16,56	16,4833	13	0,0003	41325	0,9946
109	16,56	16,7133	16,6367	14	0,0003	41339	0,9949
110	16,7133	16,8667	16,79	87	0,0021	41426	0,9970
111	16,8667	17,02	16,9433	23	0,0006	41449	0,9976
112	17,02	17,1733	17,0967	14	0,0003	41463	0,9979
113	17,1733	17,3267	17,25	22	0,0005	41485	0,9984
114	17,3267	17,48	17,4033	1	0,0000	41486	0,9985
115	17,48	17,6333	17,5567	0	0,0000	41486	0,9985
116	17,6333	17,7867	17,71	4	0,0001	41490	0,9986
117	17,7867	17,94	17,8633	1	0,0000	41491	0,9986
118	17,94	18,0933	18,0167	0	0,0000	41491	0,9986
119	18,0933	18,2467	18,17	0	0,0000	41491	0,9986
120	18,2467	18,4	18,3233	34	0,0008	41525	0,9994
121	18,4	18,5533	18,4767	0	0,0000	41525	0,9994
122	18,5533	18,7067	18,63	0	0,0000	41525	0,9994
123	18,7067	18,86	18,7833	0	0,0000	41525	0,9994
124	18,86	19,0133	18,9367	11	0,0003	41536	0,9997
125	19,0133	19,1667	19,09	14	0,0003	41550	1,0000
126	19,1667	19,32	19,2433	0	0,0000	41550	1,0000
127	19,32	19,4733	19,3967	0	0,0000	41550	1,0000
128	19,4733	19,6267	19,55	0	0,0000	41550	1,0000
129	19,6267	19,78	19,7033	0	0,0000	41550	1,0000
130	19,78	19,9333	19,8567	0	0,0000	41550	1,0000
131	19,9333	20,0867	20,01	0	0,0000	41550	1,0000
132	20,0867	20,24	20,1633	0	0,0000	41550	1,0000
133	20,24	20,3933	20,3167	0	0,0000	41550	1,0000
134	20,3933	20,5467	20,47	0	0,0000	41550	1,0000
135	20,5467	20,7	20,6233	0	0,0000	41550	1,0000
136	20,7	20,8533	20,7767	0	0,0000	41550	1,0000
137	20,8533	21,0067	20,93	0	0,0000	41550	1,0000
138	21,0067	21,16	21,0833	0	0,0000	41550	1,0000
139	21,16	21,3133	21,2367	0	0,0000	41550	1,0000
140	21,3133	21,4667	21,39	0	0,0000	41550	1,0000
141	21,4667	21,62	21,5433	0	0,0000	41550	1,0000

142	21,62	21,7733	21,6967	0	0,0000	41550	1,0000
143	21,7733	21,9267	21,85	0	0,0000	41550	1,0000
144	21,9267	22,08	22,0033	0	0,0000	41550	1,0000
145	22,08	22,2333	22,1567	0	0,0000	41550	1,0000
146	22,2333	22,3867	22,31	0	0,0000	41550	1,0000
147	22,3867	22,54	22,4633	0	0,0000	41550	1,0000
148	22,54	22,6933	22,6167	0	0,0000	41550	1,0000
149	22,6933	22,8467	22,77	0	0,0000	41550	1,0000
150	22,8467	23,0	22,9233	0	0,0000	41550	1,0000
	mayor de	23,0		0	0,0000	41550	1,0000

Media = 5,57253 Desviación Estándar = 3,65257

Anexo 8: Tabla de Frecuencias para error relativo SUI C original suburbano

<i>Clase</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>	<i>Punto Medio</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia Relativa</i>	<i>Frecuencia Acumulada</i>	<i>Frecuencia Rel. Acum.</i>
	menor o igual	0,0		0	0,0000	0	0,0000
1	0,0	0,64	0,32	1942	0,0467	1942	0,0467
2	0,64	1,28	0,96	1621	0,0390	3563	0,0858
3	1,28	1,92	1,6	1258	0,0303	4821	0,1160
4	1,92	2,56	2,24	1473	0,0355	6294	0,1515
5	2,56	3,2	2,88	1902	0,0458	8196	0,1973
6	3,2	3,84	3,52	1594	0,0384	9790	0,2356
7	3,84	4,48	4,16	1979	0,0476	11769	0,2832
8	4,48	5,12	4,8	1523	0,0367	13292	0,3199
9	5,12	5,76	5,44	1561	0,0376	14853	0,3575
10	5,76	6,4	6,08	1530	0,0368	16383	0,3943
11	6,4	7,04	6,72	1471	0,0354	17854	0,4297
12	7,04	7,68	7,36	1098	0,0264	18952	0,4561
13	7,68	8,32	8,0	1426	0,0343	20378	0,4904
14	8,32	8,96	8,64	1030	0,0248	21408	0,5152
15	8,96	9,6	9,28	945	0,0227	22353	0,5380
16	9,6	10,24	9,92	896	0,0216	23249	0,5595
17	10,24	10,88	10,56	1185	0,0285	24434	0,5881
18	10,88	11,52	11,2	1242	0,0299	25676	0,6180
19	11,52	12,16	11,84	967	0,0233	26643	0,6412
20	12,16	12,8	12,48	996	0,0240	27639	0,6652
21	12,8	13,44	13,12	881	0,0212	28520	0,6864
22	13,44	14,08	13,76	748	0,0180	29268	0,7044
23	14,08	14,72	14,4	784	0,0189	30052	0,7233
24	14,72	15,36	15,04	500	0,0120	30552	0,7353
25	15,36	16,0	15,68	413	0,0099	30965	0,7452
26	16,0	16,64	16,32	508	0,0122	31473	0,7575
27	16,64	17,28	16,96	555	0,0134	32028	0,7708
28	17,28	17,92	17,6	380	0,0091	32408	0,7800
29	17,92	18,56	18,24	384	0,0092	32792	0,7892
30	18,56	19,2	18,88	398	0,0096	33190	0,7988
31	19,2	19,84	19,52	364	0,0088	33554	0,8076
32	19,84	20,48	20,16	250	0,0060	33804	0,8136
33	20,48	21,12	20,8	275	0,0066	34079	0,8202
34	21,12	21,76	21,44	322	0,0077	34401	0,8279
35	21,76	22,4	22,08	263	0,0063	34664	0,8343
36	22,4	23,04	22,72	195	0,0047	34859	0,8390
37	23,04	23,68	23,36	161	0,0039	35020	0,8428
38	23,68	24,32	24,0	299	0,0072	35319	0,8500
39	24,32	24,96	24,64	352	0,0085	35671	0,8585
40	24,96	25,6	25,28	287	0,0069	35958	0,8654
41	25,6	26,24	25,92	419	0,0101	36377	0,8755

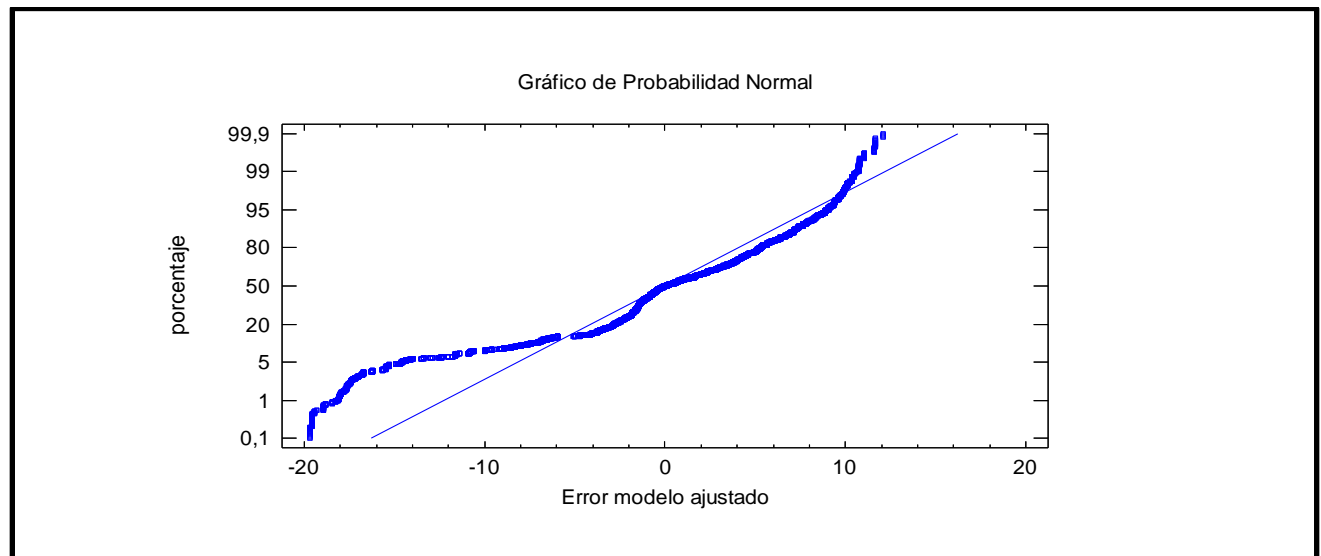
42	26,24	26,88	26,56	236	0,0057	36613	0,8812
43	26,88	27,52	27,2	165	0,0040	36778	0,8852
44	27,52	28,16	27,84	91	0,0022	36869	0,8873
45	28,16	28,8	28,48	95	0,0023	36964	0,8896
46	28,8	29,44	29,12	193	0,0046	37157	0,8943
47	29,44	30,08	29,76	173	0,0042	37330	0,8984
48	30,08	30,72	30,4	130	0,0031	37460	0,9016
49	30,72	31,36	31,04	123	0,0030	37583	0,9045
50	31,36	32,0	31,68	122	0,0029	37705	0,9075
51	32,0	32,64	32,32	150	0,0036	37855	0,9111
52	32,64	33,28	32,96	142	0,0034	37997	0,9145
53	33,28	33,92	33,6	92	0,0022	38089	0,9167
54	33,92	34,56	34,24	52	0,0013	38141	0,9180
55	34,56	35,2	34,88	187	0,0045	38328	0,9225
56	35,2	35,84	35,52	121	0,0029	38449	0,9254
57	35,84	36,48	36,16	145	0,0035	38594	0,9289
58	36,48	37,12	36,8	73	0,0018	38667	0,9306
59	37,12	37,76	37,44	87	0,0021	38754	0,9327
60	37,76	38,4	38,08	49	0,0012	38803	0,9339
61	38,4	39,04	38,72	58	0,0014	38861	0,9353
62	39,04	39,68	39,36	20	0,0005	38881	0,9358
63	39,68	40,32	40,0	28	0,0007	38909	0,9364
64	40,32	40,96	40,64	45	0,0011	38954	0,9375
65	40,96	41,6	41,28	29	0,0007	38983	0,9382
66	41,6	42,24	41,92	57	0,0014	39040	0,9396
67	42,24	42,88	42,56	46	0,0011	39086	0,9407
68	42,88	43,52	43,2	102	0,0025	39188	0,9432
69	43,52	44,16	43,84	97	0,0023	39285	0,9455
70	44,16	44,8	44,48	43	0,0010	39328	0,9465
71	44,8	45,44	45,12	14	0,0003	39342	0,9469
72	45,44	46,08	45,76	81	0,0019	39423	0,9488
73	46,08	46,72	46,4	36	0,0009	39459	0,9497
74	46,72	47,36	47,04	95	0,0023	39554	0,9520
75	47,36	48,0	47,68	49	0,0012	39603	0,9531
76	48,0	48,64	48,32	122	0,0029	39725	0,9561
77	48,64	49,28	48,96	74	0,0018	39799	0,9579
78	49,28	49,92	49,6	69	0,0017	39868	0,9595
79	49,92	50,56	50,24	49	0,0012	39917	0,9607
80	50,56	51,2	50,88	92	0,0022	40009	0,9629
81	51,2	51,84	51,52	40	0,0010	40049	0,9639
82	51,84	52,48	52,16	23	0,0006	40072	0,9644
83	52,48	53,12	52,8	104	0,0025	40176	0,9669
84	53,12	53,76	53,44	9	0,0002	40185	0,9671
85	53,76	54,4	54,08	28	0,0007	40213	0,9678
86	54,4	55,04	54,72	88	0,0021	40301	0,9699
87	55,04	55,68	55,36	44	0,0011	40345	0,9710
88	55,68	56,32	56,0	41	0,0010	40386	0,9720
89	56,32	56,96	56,64	125	0,0030	40511	0,9750
90	56,96	57,6	57,28	74	0,0018	40585	0,9768
91	57,6	58,24	57,92	113	0,0027	40698	0,9795
92	58,24	58,88	58,56	100	0,0024	40798	0,9819
93	58,88	59,52	59,2	49	0,0012	40847	0,9831
94	59,52	60,16	59,84	94	0,0023	40941	0,9853
95	60,16	60,8	60,48	44	0,0011	40985	0,9864
96	60,8	61,44	61,12	26	0,0006	41011	0,9870
97	61,44	62,08	61,76	14	0,0003	41025	0,9874
98	62,08	62,72	62,4	15	0,0004	41040	0,9877
99	62,72	63,36	63,04	15	0,0004	41055	0,9881

100	63,36	64,0	63,68	14	0,0003	41069	0,9884
101	64,0	64,64	64,32	20	0,0005	41089	0,9889
102	64,64	65,28	64,96	17	0,0004	41106	0,9893
103	65,28	65,92	65,6	0	0,0000	41106	0,9893
104	65,92	66,56	66,24	26	0,0006	41132	0,9899
105	66,56	67,2	66,88	64	0,0015	41196	0,9915
106	67,2	67,84	67,52	0	0,0000	41196	0,9915
107	67,84	68,48	68,16	31	0,0007	41227	0,9922
108	68,48	69,12	68,8	13	0,0003	41240	0,9925
109	69,12	69,76	69,44	0	0,0000	41240	0,9925
110	69,76	70,4	70,08	32	0,0008	41272	0,9933
111	70,4	71,04	70,72	12	0,0003	41284	0,9936
112	71,04	71,68	71,36	14	0,0003	41298	0,9939
113	71,68	72,32	72,0	38	0,0009	41336	0,9948
114	72,32	72,96	72,64	24	0,0006	41360	0,9954
115	72,96	73,6	73,28	25	0,0006	41385	0,9960
116	73,6	74,24	73,92	36	0,0009	41421	0,9969
117	74,24	74,88	74,56	16	0,0004	41437	0,9973
118	74,88	75,52	75,2	53	0,0013	41490	0,9986
119	75,52	76,16	75,84	48	0,0012	41538	0,9997
120	76,16	76,8	76,48	12	0,0003	41550	1,0000
121	76,8	77,44	77,12	0	0,0000	41550	1,0000
122	77,44	78,08	77,76	0	0,0000	41550	1,0000
123	78,08	78,72	78,4	0	0,0000	41550	1,0000
124	78,72	79,36	79,04	0	0,0000	41550	1,0000
125	79,36	80,0	79,68	0	0,0000	41550	1,0000
126	80,0	80,64	80,32	0	0,0000	41550	1,0000
127	80,64	81,28	80,96	0	0,0000	41550	1,0000
128	81,28	81,92	81,6	0	0,0000	41550	1,0000
129	81,92	82,56	82,24	0	0,0000	41550	1,0000
130	82,56	83,2	82,88	0	0,0000	41550	1,0000
131	83,2	83,84	83,52	0	0,0000	41550	1,0000
132	83,84	84,48	84,16	0	0,0000	41550	1,0000
133	84,48	85,12	84,8	0	0,0000	41550	1,0000
134	85,12	85,76	85,44	0	0,0000	41550	1,0000
135	85,76	86,4	86,08	0	0,0000	41550	1,0000
136	86,4	87,04	86,72	0	0,0000	41550	1,0000
137	87,04	87,68	87,36	0	0,0000	41550	1,0000
138	87,68	88,32	88,0	0	0,0000	41550	1,0000
139	88,32	88,96	88,64	0	0,0000	41550	1,0000
140	88,96	89,6	89,28	0	0,0000	41550	1,0000
141	89,6	90,24	89,92	0	0,0000	41550	1,0000
142	90,24	90,88	90,56	0	0,0000	41550	1,0000
143	90,88	91,52	91,2	0	0,0000	41550	1,0000
144	91,52	92,16	91,84	0	0,0000	41550	1,0000
145	92,16	92,8	92,48	0	0,0000	41550	1,0000
146	92,8	93,44	93,12	0	0,0000	41550	1,0000
147	93,44	94,08	93,76	0	0,0000	41550	1,0000
148	94,08	94,72	94,4	0	0,0000	41550	1,0000
149	94,72	95,36	95,04	0	0,0000	41550	1,0000
150	95,36	96,0	95,68	0	0,0000	41550	1,0000
	mayor de	96,0		0	0,0000	41550	1,0000

Media = 13,0678 Desviación Estándar = 13,9295

Anexo 9: Resumen de resultados para el ambiente sub-urbano

Fuente	Difieren Significativamente						Mediciones	Pérdida promedio (dB)	Desviación pérdidas (dB)	Error relativo medio (%)	¿Modelo funciona?
Pérdidas calculadas	X						41550	136,307	9,55	No aplica	No aplica
COST-HATA 231		X					41550	231,859	27,46	71,46	NO
WI			X				41550	232,88	12,42	18,14	NO
SUI-A				X			41550	235,926	28,94	70,49	NO
SUI-B					X		41550	231,859	27,46	73,47	NO
SUI-C						X	41550	129,355	26,56	13,06	NO
Modelo SUI-C Ajustado							41550	136,308	3,44	5,57	NO



Anexo 10: Distribución de probabilidad normal del error del modelo ajustado en el ambiente urbano.

Anexo 11: Tabla de Frecuencias para Error relativo SUI C original urbano

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. Acum.
	menor o igual	0,0		0	0,0000	0	0,0000
1	0,0	0,186667	0,0933333	186	0,0161	186	0,0161
2	0,186667	0,373333	0,28	73	0,0063	259	0,0224
3	0,373333	0,56	0,466667	160	0,0138	419	0,0362
4	0,56	0,746667	0,653333	150	0,0130	569	0,0492
5	0,746667	0,933333	0,84	95	0,0082	664	0,0574
6	0,933333	1,12	1,02667	68	0,0059	732	0,0633
7	1,12	1,30667	1,21333	182	0,0157	914	0,0790
8	1,30667	1,49333	1,4	63	0,0054	977	0,0845
9	1,49333	1,68	1,58667	265	0,0229	1242	0,1074

10	1,68	1,86667	1,77333	84	0,0073	1326	0,1147
11	1,86667	2,05333	1,96	174	0,0150	1500	0,1297
12	2,05333	2,24	2,14667	27	0,0023	1527	0,1320
13	2,24	2,42667	2,33333	114	0,0099	1641	0,1419
14	2,42667	2,61333	2,52	156	0,0135	1797	0,1554
15	2,61333	2,8	2,70667	88	0,0076	1885	0,1630
16	2,8	2,98667	2,89333	230	0,0199	2115	0,1829
17	2,98667	3,17333	3,08	112	0,0097	2227	0,1926
18	3,17333	3,36	3,26667	117	0,0101	2344	0,2027
19	3,36	3,54667	3,45333	82	0,0071	2426	0,2098
20	3,54667	3,73333	3,64	118	0,0102	2544	0,2200
21	3,73333	3,92	3,82667	118	0,0102	2662	0,2302
22	3,92	4,10667	4,01333	151	0,0131	2813	0,2432
23	4,10667	4,29333	4,2	130	0,0112	2943	0,2545
24	4,29333	4,48	4,38667	99	0,0086	3042	0,2630
25	4,48	4,66667	4,57333	152	0,0131	3194	0,2762
26	4,66667	4,85333	4,76	210	0,0182	3404	0,2943
27	4,85333	5,04	4,94667	114	0,0099	3518	0,3042
28	5,04	5,22667	5,13333	169	0,0146	3687	0,3188
29	5,22667	5,41333	5,32	165	0,0143	3852	0,3331
30	5,41333	5,6	5,50667	134	0,0116	3986	0,3447
31	5,6	5,78667	5,69333	317	0,0274	4303	0,3721
32	5,78667	5,97333	5,88	352	0,0304	4655	0,4025
33	5,97333	6,16	6,06667	180	0,0156	4835	0,4181
34	6,16	6,34667	6,25333	260	0,0225	5095	0,4406
35	6,34667	6,53333	6,44	193	0,0167	5288	0,4572
36	6,53333	6,72	6,62667	375	0,0324	5663	0,4897
37	6,72	6,90667	6,81333	220	0,0190	5883	0,5087
38	6,90667	7,09333	7,0	285	0,0246	6168	0,5333
39	7,09333	7,28	7,18667	441	0,0381	6609	0,5715
40	7,28	7,46667	7,37333	505	0,0437	7114	0,6151
41	7,46667	7,65333	7,56	452	0,0391	7566	0,6542
42	7,65333	7,84	7,74667	410	0,0355	7976	0,6897
43	7,84	8,02667	7,93333	226	0,0195	8202	0,7092
44	8,02667	8,21333	8,12	123	0,0106	8325	0,7198
45	8,21333	8,4	8,30667	169	0,0146	8494	0,7345
46	8,4	8,58667	8,49333	40	0,0035	8534	0,7379
47	8,58667	8,77333	8,68	81	0,0070	8615	0,7449
48	8,77333	8,96	8,86667	13	0,0011	8628	0,7460
49	8,96	9,14667	9,05333	65	0,0056	8693	0,7517
50	9,14667	9,33333	9,24	67	0,0058	8760	0,7575
51	9,33333	9,52	9,42667	161	0,0139	8921	0,7714
52	9,52	9,70667	9,61333	129	0,0112	9050	0,7825
53	9,70667	9,89333	9,8	122	0,0105	9172	0,7931
54	9,89333	10,08	9,98667	120	0,0104	9292	0,8035
55	10,08	10,2667	10,1733	139	0,0120	9431	0,8155
56	10,2667	10,4533	10,36	59	0,0051	9490	0,8206
57	10,4533	10,64	10,5467	15	0,0013	9505	0,8219
58	10,64	10,8267	10,7333	38	0,0033	9543	0,8252
59	10,8267	11,0133	10,92	13	0,0011	9556	0,8263
60	11,0133	11,2	11,1067	65	0,0056	9621	0,8319
61	11,2	11,3867	11,2933	38	0,0033	9659	0,8352
62	11,3867	11,5733	11,48	36	0,0031	9695	0,8383
63	11,5733	11,76	11,6667	23	0,0020	9718	0,8403
64	11,76	11,9467	11,8533	72	0,0062	9790	0,8465
65	11,9467	12,1333	12,04	68	0,0059	9858	0,8524
66	12,1333	12,32	12,2267	15	0,0013	9873	0,8537
67	12,32	12,5067	12,4133	61	0,0053	9934	0,8590

68	12,5067	12,6933	12,6	95	0,0082	10029	0,8672
69	12,6933	12,88	12,7867	80	0,0069	10109	0,8741
70	12,88	13,0667	12,9733	74	0,0064	10183	0,8805
71	13,0667	13,2533	13,16	41	0,0035	10224	0,8840
72	13,2533	13,44	13,3467	75	0,0065	10299	0,8905
73	13,44	13,6267	13,5333	46	0,0040	10345	0,8945
74	13,6267	13,8133	13,72	74	0,0064	10419	0,9009
75	13,8133	14,0	13,9067	33	0,0029	10452	0,9038
76	14,0	14,1867	14,0933	156	0,0135	10608	0,9173
77	14,1867	14,3733	14,28	33	0,0029	10641	0,9201
78	14,3733	14,56	14,4667	59	0,0051	10700	0,9252
79	14,56	14,7467	14,6533	72	0,0062	10772	0,9314
80	14,7467	14,9333	14,84	22	0,0019	10794	0,9333
81	14,9333	15,12	15,0267	9	0,0008	10803	0,9341
82	15,12	15,3067	15,2133	36	0,0031	10839	0,9372
83	15,3067	15,4933	15,4	27	0,0023	10866	0,9396
84	15,4933	15,68	15,5867	33	0,0029	10899	0,9424
85	15,68	15,8667	15,7733	0	0,0000	10899	0,9424
86	15,8667	16,0533	15,96	29	0,0025	10928	0,9449
87	16,0533	16,24	16,1467	100	0,0086	11028	0,9536
88	16,24	16,4267	16,3333	19	0,0016	11047	0,9552
89	16,4267	16,6133	16,52	28	0,0024	11075	0,9576
90	16,6133	16,8	16,7067	27	0,0023	11102	0,9600
91	16,8	16,9867	16,8933	2	0,0002	11104	0,9601
92	16,9867	17,1733	17,08	45	0,0039	11149	0,9640
93	17,1733	17,36	17,2667	47	0,0041	11196	0,9681
94	17,36	17,5467	17,4533	21	0,0018	11217	0,9699
95	17,5467	17,7333	17,64	7	0,0006	11224	0,9705
96	17,7333	17,92	17,8267	0	0,0000	11224	0,9705
97	17,92	18,1067	18,0133	0	0,0000	11224	0,9705
98	18,1067	18,2933	18,2	0	0,0000	11224	0,9705
99	18,2933	18,48	18,3867	0	0,0000	11224	0,9705
100	18,48	18,6667	18,5733	0	0,0000	11224	0,9705
101	18,6667	18,8533	18,76	0	0,0000	11224	0,9705
102	18,8533	19,04	18,9467	0	0,0000	11224	0,9705
103	19,04	19,2267	19,1333	0	0,0000	11224	0,9705
104	19,2267	19,4133	19,32	15	0,0013	11239	0,9718
105	19,4133	19,6	19,5067	0	0,0000	11239	0,9718
106	19,6	19,7867	19,6933	0	0,0000	11239	0,9718
107	19,7867	19,9733	19,88	0	0,0000	11239	0,9718
108	19,9733	20,16	20,0667	0	0,0000	11239	0,9718
109	20,16	20,3467	20,2533	25	0,0022	11264	0,9740
110	20,3467	20,5333	20,44	0	0,0000	11264	0,9740
111	20,5333	20,72	20,6267	0	0,0000	11264	0,9740
112	20,72	20,9067	20,8133	38	0,0033	11302	0,9773
113	20,9067	21,0933	21,0	0	0,0000	11302	0,9773
114	21,0933	21,28	21,1867	13	0,0011	11315	0,9784
115	21,28	21,4667	21,3733	0	0,0000	11315	0,9784
116	21,4667	21,6533	21,56	22	0,0019	11337	0,9803
117	21,6533	21,84	21,7467	0	0,0000	11337	0,9803
118	21,84	22,0267	21,9333	1	0,0001	11338	0,9804
119	22,0267	22,2133	22,12	33	0,0029	11371	0,9832
120	22,2133	22,4	22,3067	48	0,0042	11419	0,9874
121	22,4	22,5867	22,4933	0	0,0000	11419	0,9874
122	22,5867	22,7733	22,68	0	0,0000	11419	0,9874
123	22,7733	22,96	22,8667	22	0,0019	11441	0,9893
124	22,96	23,1467	23,0533	0	0,0000	11441	0,9893
125	23,1467	23,3333	23,24	0	0,0000	11441	0,9893

126	23,3333	23,52	23,4267	0	0,0000	11441	0,9893
127	23,52	23,7067	23,6133	35	0,0030	11476	0,9923
128	23,7067	23,8933	23,8	0	0,0000	11476	0,9923
129	23,8933	24,08	23,9867	0	0,0000	11476	0,9923
130	24,08	24,2667	24,1733	28	0,0024	11504	0,9947
131	24,2667	24,4533	24,36	13	0,0011	11517	0,9958
132	24,4533	24,64	24,5467	0	0,0000	11517	0,9958
133	24,64	24,8267	24,7333	0	0,0000	11517	0,9958
134	24,8267	25,0133	24,92	23	0,0020	11540	0,9978
135	25,0133	25,2	25,1067	0	0,0000	11540	0,9978
136	25,2	25,3867	25,2933	13	0,0011	11553	0,9990
137	25,3867	25,5733	25,48	0	0,0000	11553	0,9990
138	25,5733	25,76	25,6667	12	0,0010	11565	1,0000
139	25,76	25,9467	25,8533	0	0,0000	11565	1,0000
140	25,9467	26,1333	26,04	0	0,0000	11565	1,0000
141	26,1333	26,32	26,2267	0	0,0000	11565	1,0000
142	26,32	26,5067	26,4133	0	0,0000	11565	1,0000
143	26,5067	26,6933	26,6	0	0,0000	11565	1,0000
144	26,6933	26,88	26,7867	0	0,0000	11565	1,0000
145	26,88	27,0667	26,9733	0	0,0000	11565	1,0000
146	27,0667	27,2533	27,16	0	0,0000	11565	1,0000
147	27,2533	27,44	27,3467	0	0,0000	11565	1,0000
148	27,44	27,6267	27,5333	0	0,0000	11565	1,0000
149	27,6267	27,8133	27,72	0	0,0000	11565	1,0000
150	27,8133	28,0	27,9067	0	0,0000	11565	1,0000
	mayor de	28,0		0	0,0000	11565	1,0000

Media = 7,26623 Desviación Estándar = 4,71138

Anexo 12: Tabla de Frecuencias para error relativo mod ajustado urbano

<i>Clase</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>	<i>Punto Medio</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia Relativa</i>	<i>Frecuencia Acumulada</i>	<i>Frecuencia Rel. Acum.</i>
	menor o igual	0,0		0	0,0000	0	0,0000
1	0,0	0,126667	0,0633333	243	0,0210	243	0,0210
2	0,126667	0,253333	0,19	224	0,0194	467	0,0404
3	0,253333	0,38	0,316667	320	0,0277	787	0,0681
4	0,38	0,506667	0,443333	390	0,0337	1177	0,1018
5	0,506667	0,633333	0,57	378	0,0327	1555	0,1345
6	0,633333	0,76	0,696667	244	0,0211	1799	0,1556
7	0,76	0,886667	0,823333	241	0,0208	2040	0,1764
8	0,886667	1,01333	0,95	304	0,0263	2344	0,2027
9	1,01333	1,14	1,07667	466	0,0403	2810	0,2430
10	1,14	1,26667	1,20333	407	0,0352	3217	0,2782
11	1,26667	1,39333	1,33	453	0,0392	3670	0,3173
12	1,39333	1,52	1,45667	175	0,0151	3845	0,3325
13	1,52	1,64667	1,58333	234	0,0202	4079	0,3527
14	1,64667	1,77333	1,71	221	0,0191	4300	0,3718
15	1,77333	1,9	1,83667	195	0,0169	4495	0,3887
16	1,9	2,02667	1,96333	237	0,0205	4732	0,4092
17	2,02667	2,15333	2,09	219	0,0189	4951	0,4281
18	2,15333	2,28	2,21667	244	0,0211	5195	0,4492
19	2,28	2,40667	2,34333	81	0,0070	5276	0,4562
20	2,40667	2,53333	2,47	239	0,0207	5515	0,4769
21	2,53333	2,66	2,59667	170	0,0147	5685	0,4916
22	2,66	2,78667	2,72333	189	0,0163	5874	0,5079
23	2,78667	2,91333	2,85	267	0,0231	6141	0,5310
24	2,91333	3,04	2,97667	223	0,0193	6364	0,5503
25	3,04	3,16667	3,10333	157	0,0136	6521	0,5639
26	3,16667	3,29333	3,23	111	0,0096	6632	0,5735

27	3,29333	3,42	3,35667	105	0,0091	6737	0,5825
28	3,42	3,54667	3,48333	168	0,0145	6905	0,5971
29	3,54667	3,67333	3,61	98	0,0085	7003	0,6055
30	3,67333	3,8	3,73667	176	0,0152	7179	0,6208
31	3,8	3,92667	3,86333	123	0,0106	7302	0,6314
32	3,92667	4,05333	3,99	197	0,0170	7499	0,6484
33	4,05333	4,18	4,11667	60	0,0052	7559	0,6536
34	4,18	4,30667	4,24333	98	0,0085	7657	0,6621
35	4,30667	4,43333	4,37	82	0,0071	7739	0,6692
36	4,43333	4,56	4,49667	111	0,0096	7850	0,6788
37	4,56	4,68667	4,62333	66	0,0057	7916	0,6845
38	4,68667	4,81333	4,75	138	0,0119	8054	0,6964
39	4,81333	4,94	4,87667	166	0,0144	8220	0,7108
40	4,94	5,06667	5,00333	157	0,0136	8377	0,7243
41	5,06667	5,19333	5,13	129	0,0112	8506	0,7355
42	5,19333	5,32	5,25667	147	0,0127	8653	0,7482
43	5,32	5,44667	5,38333	119	0,0103	8772	0,7585
44	5,44667	5,57333	5,51	147	0,0127	8919	0,7712
45	5,57333	5,7	5,63667	105	0,0091	9024	0,7803
46	5,7	5,82667	5,76333	85	0,0073	9109	0,7876
47	5,82667	5,95333	5,89	137	0,0118	9246	0,7995
48	5,95333	6,08	6,01667	121	0,0105	9367	0,8099
49	6,08	6,20667	6,14333	83	0,0072	9450	0,8171
50	6,20667	6,33333	6,27	94	0,0081	9544	0,8252
51	6,33333	6,46	6,39667	129	0,0112	9673	0,8364
52	6,46	6,58667	6,52333	73	0,0063	9746	0,8427
53	6,58667	6,71333	6,65	199	0,0172	9945	0,8599
54	6,71333	6,84	6,77667	156	0,0135	10101	0,8734
55	6,84	6,96667	6,90333	96	0,0083	10197	0,8817
56	6,96667	7,09333	7,03	44	0,0038	10241	0,8855
57	7,09333	7,22	7,15667	18	0,0016	10259	0,8871
58	7,22	7,34667	7,28333	99	0,0086	10358	0,8956
59	7,34667	7,47333	7,41	29	0,0025	10387	0,8981
60	7,47333	7,6	7,53667	0	0,0000	10387	0,8981
61	7,6	7,72667	7,66333	11	0,0010	10398	0,8991
62	7,72667	7,85333	7,79	13	0,0011	10411	0,9002
63	7,85333	7,98	7,91667	35	0,0030	10446	0,9032
64	7,98	8,10667	8,04333	24	0,0021	10470	0,9053
65	8,10667	8,23333	8,17	0	0,0000	10470	0,9053
66	8,23333	8,36	8,29667	8	0,0007	10478	0,9060
67	8,36	8,48667	8,42333	18	0,0016	10496	0,9076
68	8,48667	8,61333	8,55	17	0,0015	10513	0,9090
69	8,61333	8,74	8,67667	6	0,0005	10519	0,9096
70	8,74	8,86667	8,80333	16	0,0014	10535	0,9109
71	8,86667	8,99333	8,93	24	0,0021	10559	0,9130
72	8,99333	9,12	9,05667	44	0,0038	10603	0,9168
73	9,12	9,24667	9,18333	11	0,0010	10614	0,9178
74	9,24667	9,37333	9,31	0	0,0000	10614	0,9178
75	9,37333	9,5	9,43667	50	0,0043	10664	0,9221
76	9,5	9,62667	9,56333	18	0,0016	10682	0,9236
77	9,62667	9,75333	9,69	0	0,0000	10682	0,9236
78	9,75333	9,88	9,81667	0	0,0000	10682	0,9236
79	9,88	10,00667	9,94333	0	0,0000	10682	0,9236
80	10,00667	10,1333	10,07	11	0,0010	10693	0,9246
81	10,1333	10,26	10,1967	0	0,0000	10693	0,9246
82	10,26	10,3867	10,3233	0	0,0000	10693	0,9246
83	10,3867	10,5133	10,45	19	0,0016	10712	0,9262
84	10,5133	10,64	10,5767	8	0,0007	10720	0,9269

85	10,64	10,7667	10,7033	7	0,0006	10727	0,9275
86	10,7667	10,8933	10,83	4	0,0003	10731	0,9279
87	10,8933	11,02	10,9567	4	0,0003	10735	0,9282
88	11,02	11,1467	11,0833	0	0,0000	10735	0,9282
89	11,1467	11,2733	11,21	8	0,0007	10743	0,9289
90	11,2733	11,4	11,3367	0	0,0000	10743	0,9289
91	11,4	11,5267	11,4633	9	0,0008	10752	0,9297
92	11,5267	11,6533	11,59	8	0,0007	10760	0,9304
93	11,6533	11,78	11,7167	1	0,0001	10761	0,9305
94	11,78	11,9067	11,8433	0	0,0000	10761	0,9305
95	11,9067	12,0333	11,97	10	0,0009	10771	0,9313
96	12,0333	12,16	12,0967	53	0,0046	10824	0,9359
97	12,16	12,2867	12,2233	11	0,0010	10835	0,9369
98	12,2867	12,4133	12,35	31	0,0027	10866	0,9396
99	12,4133	12,54	12,4767	38	0,0033	10904	0,9428
100	12,54	12,6667	12,6033	9	0,0008	10913	0,9436
101	12,6667	12,7933	12,73	14	0,0012	10927	0,9448
102	12,7933	12,92	12,8567	19	0,0016	10946	0,9465
103	12,92	13,0467	12,9833	0	0,0000	10946	0,9465
104	13,0467	13,1733	13,11	7	0,0006	10953	0,9471
105	13,1733	13,3	13,2367	38	0,0033	10991	0,9504
106	13,3	13,4267	13,3633	43	0,0037	11034	0,9541
107	13,4267	13,5533	13,49	14	0,0012	11048	0,9553
108	13,5533	13,68	13,6167	10	0,0009	11058	0,9562
109	13,68	13,8067	13,7433	0	0,0000	11058	0,9562
110	13,8067	13,9333	13,87	0	0,0000	11058	0,9562
111	13,9333	14,06	13,9967	0	0,0000	11058	0,9562
112	14,06	14,1867	14,1233	40	0,0035	11098	0,9596
113	14,1867	14,3133	14,25	0	0,0000	11098	0,9596
114	14,3133	14,44	14,3767	15	0,0013	11113	0,9609
115	14,44	14,5667	14,5033	9	0,0008	11122	0,9617
116	14,5667	14,6933	14,63	56	0,0048	11178	0,9665
117	14,6933	14,82	14,7567	4	0,0003	11182	0,9669
118	14,82	14,9467	14,8833	17	0,0015	11199	0,9684
119	14,9467	15,0733	15,01	9	0,0008	11208	0,9691
120	15,0733	15,2	15,1367	36	0,0031	11244	0,9722
121	15,2	15,3267	15,2633	39	0,0034	11283	0,9756
122	15,3267	15,4533	15,39	47	0,0041	11330	0,9797
123	15,4533	15,58	15,5167	63	0,0054	11393	0,9851
124	15,58	15,7067	15,6433	26	0,0022	11419	0,9874
125	15,7067	15,8333	15,77	0	0,0000	11419	0,9874
126	15,8333	15,96	15,8967	29	0,0025	11448	0,9899
127	15,96	16,0867	16,0233	9	0,0008	11457	0,9907
128	16,0867	16,2133	16,15	0	0,0000	11457	0,9907
129	16,2133	16,34	16,2767	0	0,0000	11457	0,9907
130	16,34	16,4667	16,4033	9	0,0008	11466	0,9914
131	16,4667	16,5933	16,53	0	0,0000	11466	0,9914
132	16,5933	16,72	16,6567	9	0,0008	11475	0,9922
133	16,72	16,8467	16,7833	0	0,0000	11475	0,9922
134	16,8467	16,9733	16,91	22	0,0019	11497	0,9941
135	16,9733	17,1	17,0367	0	0,0000	11497	0,9941
136	17,1	17,2267	17,1633	2	0,0002	11499	0,9943
137	17,2267	17,3533	17,29	11	0,0010	11510	0,9952
138	17,3533	17,48	17,4167	0	0,0000	11510	0,9952
139	17,48	17,6067	17,5433	30	0,0026	11540	0,9978
140	17,6067	17,7333	17,67	16	0,0014	11556	0,9992
141	17,7333	17,86	17,7967	0	0,0000	11556	0,9992
142	17,86	17,9867	17,9233	9	0,0008	11565	1,0000

143	17,9867	18,1133	18,05	0	0,0000	11565	1,0000
144	18,1133	18,24	18,1767	0	0,0000	11565	1,0000
145	18,24	18,3667	18,3033	0	0,0000	11565	1,0000
146	18,3667	18,4933	18,43	0	0,0000	11565	1,0000
147	18,4933	18,62	18,5567	0	0,0000	11565	1,0000
148	18,62	18,7467	18,6833	0	0,0000	11565	1,0000
149	18,7467	18,8733	18,81	0	0,0000	11565	1,0000
150	18,8733	19,0	18,9367	0	0,0000	11565	1,0000
	mayor de	19,0		0	0,0000	11565	1,0000

Media = 3,83198 Desviación Estándar = 3,72055

Anexo 13: Resumen de resultados para el ambiente sub-urbano

Fuente	Difieren Significativamente					Mediciones	Pérdida promedio (dB)	Desviación pérdidas (dB)	Error relativo medio (%)	¿Modelo funciona?	
Pérdidas calculadas	X					11565	135,102	8,64	No aplica	No aplica	
COST-HATA 231		X				11565	229,15	7,78	39,64	NO	
WI			X			11565	96,843	7,25	25,27	NO	
SUI-A				X		11565	174,336	15,23	19,54	NO	
SUI-B					X	11565	170,797	13,45	17,73	NO	
SUI-C						X	11565	139,214	10,29	8,44	NO
Modelo SUI-C Ajustado						11565	135,102	5,48	3,83	NO	