



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

Validación de un modelo de propagación empírico, considerando variables ambientales, para las áreas rurales de la cuenca baja del río Guayas en la frecuencia de 5 GHz.

AUTOR:

Ing. Chávez Andrade Gerardo Antonio

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de
MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil, 4 de marzo del 2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Chávez Andrade Gerardo Antonio**, como requerimiento para la obtención del Título de **Magister en Telecomunicaciones**.

TUTOR

f. _____

MSc. Manuel Romero Paz

DIRECTOR DEL PROGRAMA

f. _____

MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil, 4 de marzo del 2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Chávez Andrade Gerardo Antonio

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación: “Validación de un modelo de propagación empírico, considerando variables ambientales, para las áreas rurales de la cuenca baja del río Guayas en la frecuencia de 5 GHz”, previo a la obtención del Título de Magister en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, 4 de marzo del 2020

EL AUTOR

f. _____

Chávez Andrade Gerardo Antonio



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, Chávez Andrade Gerardo Antonio

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la publicación en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“Validación de un modelo de propagación empírico, considerando variables ambientales, para las áreas rurales de la cuenca baja del río Guayas en la frecuencia de 5 GHz”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 4 de marzo del 2020

EL AUTOR:

f. _____

Chavez Andrade Gerardo Antonio

REPORTE URKUND

The screenshot displays the URKUND interface. On the left, a document summary is provided: 'Documento: Tesis Maestría CHAVEZ, G. G. (163824084)', 'Presentado: 2020-02-12 20:19 (-05:00)', 'Presentado por: orlandophilco_7@hotmail.com', 'Recibido: orlando.philco.ucsg@anelias.arkund.com', and 'Mensaje: tesis maestría Chavez. Mostrar el mensaje completo'. A green box indicates that 0% of the 29 pages are composed of text present in the sources.

On the right, a 'Lista de fuentes' (List of sources) panel is visible, showing a list of references under the 'Bloques' tab. The sources include:

- TESIS_A_HUERTA.docx
- http://www.neticon.com/legado/vol_wisp.php?tema=soluciones@eda
- 100% WISP Solutions for Wireless ISP, HotSpot, Mesh, WLAN, Wireless LAN, Wi-Fi and WIMAX...
- https://www.academia.edu/24566751/PROCESABILIDADES_Y_ESTADISTICA_Para_inge...
- Fuentes alternativas
- 1550422011_401_Tarea_02_-_Jrniaga_Ramirez.docx
- Fuentes no usadas

At the bottom of the interface, the document's title 'SISTEMA DE POSTGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES' is displayed. Below it, the following text is shown:

TEMA: Validación de un modelo de propagación empírico, considerando variables ambientales, para las áreas rurales de la cuenca bajo del río Guayas en la frecuencia de 5 GHz.

AUTOR: Ing. Chávez Andrade Gerardo Antonio

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR: MSc. Luis Córdoba Rivadeneira

Guayaquil, Ecuador, 06 de mayo del 2020

SISTEMA DE POSTGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por Chávez Andrade Gerardo Antonio, como requerimiento para la obtención del Título de Magister en Telecomunicaciones.

DEDICATORIA

A mis padres que me enseñaron el valor del trabajo y que los sueños se pueden alcanzar, gracias a su apoyo y amor incondicional.

AGRADECIMIENTO

A Dios por su bendición constante y por los dones otorgados que me ha permitido avanzar en el ámbito académico y profesional.

A mis padres por su apoyo constante y palabras de aliento.

A mi tutor MSc. Manuel Romero por su guía y paciencia durante todo el periodo de elaboración de la Tesis.

A María José Carrera por su apoyo y comprensión y en especial por su ayuda en los momentos que necesitaba un impulso para seguir adelante.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

MSc. Manuel Romero Paz
TUTOR

f. _____

MSc. Manuel Romero Paz
DIRECTOR DEL PROGRAMA

f. _____

MSc. Orlando Philco Asqui
REVISOR

f. _____

MSc. Luis Córdova Rivadeneira
REVISOR

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1 : Descripción del proyecto de intervención	2
1.1 Introducción.	2
1.2 Definición del problema	3
1.3 Justificación del problema	4
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo General.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
1.5 Hipótesis.....	6
1.6 Metodología de la Investigación.....	7
CAPÍTULO 2 : Principales aspectos de la propagación en exteriores para las redes WLAN	8
2.1 Propagación de redes WLAN en exteriores.	8
2.1.1 Perdidas por recorrido en espacio libre.	9
2.1.2 Absorción.	9
2.1.3 Refracción.....	10
2.1.4 Reflexión.	11
2.1.5 Difracción.	12
2.2 Principales Características del Estándar 802.11.	13
2.3 Principales Modelos de propagación usados en redes WLAN.	15
2.3.1 Modelo de Young.	15
2.3.2 Modelo de Lee.	16
2.3.3 Modelo Okumura-Hata.	17
2.3.4 Modelo SUI (Stanford University Interim).....	18
2.3.5 Modelo Venezuela-Colombia.	20
CAPÍTULO 3 : Recolección de mediciones en ambientes exteriores.....	21

3.1 Zona Geográfica considerada para recolección de mediciones.	21
3.2 Hardware usado para recolección de Datos.	22
3.2.1 Equipo Transmisor.	22
3.2.2 Equipo Receptor.	23
3.3 Estación meteorológica utilizada para mediciones ambientales.	25
3.4 Software empleado para recolección de niveles de señal.	28
3.5 Resultados de la recolección de mediciones.	30
CAPÍTULO 4 : Desarrollo de modelo de propagación empírico.	32
4.1 Técnicas estadísticas y software empleado.	32
4.2 Desarrollo de modelo de propagación.	33
4.2.1 Modelo de propagación sin considerar variables ambientales.	34
4.2.2 Modelo de propagación considerando variables ambientales.	38
4.3 Análisis comparativo de modelo de propagación resultante.	41
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	45
CONCLUSIONES.	45
RECOMENDACIONES.	47
BIBLIOGRAFIA.	48
ANEXOS.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Área geográfica de la cuenca baja del río Guayas.	5
Figura 2.1. Topología básica de red WLAN entre ISP - Cliente.	8
Figura 2.2. Curva de coeficiente de absorción η	10
Figura 2.3. Refracción de una frontera entre dos medios.	11
Figura 2.4. Reflexión de una onda electromagnética entre dos medios. ...	12
Figura 2.5. Difracción de ondas electromagnéticas – Efecto filo de cuchilla.	13
Figura 3.1. Enlaces inalámbricos La Troncal – Mapa cnMaestro.....	22
Figura 3.2. Access Point Cambium Networks PMP450m con antena integrada de 90°.	23
Figura 3.3. Modulo Suscriptor Cambium Networks PMP450b y PMP450i.	24
Figura 3.4. Estación de vigilancia meteorológica WS-1401-IP.	26
Figura 3.5. Proceso de conectividad de Estación Meteorológica WS-1401- IP.	27
Figura 3.6. Dashboard de administración cnMaestro Equipo transmisor - SEC1.	28
Figura 3.7. Dashboard de reporte “Performance” cnMaestro.	28
Figura 3.8: Dashboard de reporte “Devices” cnMaestro.	30
Figura 3.9. Niveles de lluvia registrados del 19 noviembre al 17 de julio 2019.	31
Figura 4.1. Variables para consideradas para análisis en Software TIBCO Statistica.	34
Figura 4.2. Configuración de Herramienta “Nonlinear Estimation”.	35
Figura 4.3. Resultados de Herramienta “Nonlinear Estimation”.	36
Figura 4.4. Configuración de Herramienta Scatterplot en Software TIBCO Statistica.	36
Figura 4.5. Comparativa de mediciones observadas y modelo de propagación calculado.	37
Figura 4.6. Modelo de propagación observado y calculado considerando presencia de lluvia.	38
Figura 4.7. Modelo de propagación observado y calculado considerando presencia de lluvia.	39

Figura 4.8. Curvas de atenuación específica basado en UIT-R P.838-3..	40
Figura 4.9. Comparativa de distribución de resultados teóricos mediante Diagrama de cajas.	41
Figura 4.10. Comparativa gráfica de modelos de propagación.	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Comparativa y Evolución de los Estándares IEEE 802.11	14
Tabla 2.2: Parámetros de terreno para modelo de propagación de Lee. .	17
Tabla 2.3: Valores de clasificación del terreno para Modelo SUI.....	19
Tabla 3.1: Características de montaje y configuración de equipo transmisor.	23
Tabla 3.2: Información de suscriptores PMP450 conectados con Nodo Cerro Huaquillas.	25
Tabla 3.3: Características de sensores disponibles en Estación Meteorológica WS-1401.	27
Tabla 3.4: Campos disponibles en reportes “Performance” de cnMaestro	29
Tabla 4.1: Grupos de mediciones por precipitación de lluvia.	33
Tabla 4.2: Modelos de propagación calculados con presencia de lluvia. .	40
Tabla 4.3: Análisis básico de estadística descriptiva para modelos de propagación analizados.	42
Tabla 4.4: Modelos de propagación calculados con presencia de lluvia. .	44

RESUMEN

El adecuado diseño y planificación de las redes inalámbricas de área local o WLAN depende principalmente de la precisión de las herramientas de simulación con las que se efectúen los estudios de factibilidad y es en este contexto donde se aprecia la importancia de contar con modelos de propagación confiables y adaptados para los diferentes ambientes de interés donde se implementará un sistema de telecomunicaciones, ya que al contar con un acertado modelo de propagación se conseguirá predicciones de los niveles de señal con un mayor grado de confianza. Para el caso de ambientes exteriores la cantidad de variables como las ambientales, tipo de terreno, vegetación, etc., generan la necesidad de contar con modelos de propagación más específicos como es el caso de la “Cuenca Baja del Rio Guayas” considerada en el presente estudio debido a su interés económico y productivo para el Ecuador. En el presente estudio se valida la eficacia de un modelo de propagación empírico elaborado a partir de 310.552 mediciones recolectadas entre noviembre del 2018 y julio del 2019 para 36 clientes suscriptores en la frecuencia de 5GHz, considerando también el efecto que la presencia de lluvia tiene sobre los niveles de señal recibida con el uso de una estación meteorológica. Los resultados obtenidos permiten determinar que el modelo de propagación empírico elaborado presenta un mayor nivel de efectividad, para el ambiente y frecuencia considerados, que varios de los modelos más conocidos y ampliamente utilizados.

Palabras Claves: Telecomunicaciones, Comunicaciones Inalámbricas, Área Rural, Proveedor de Servicios de Internet, Modelo de Propagación.

ABSTRACT

The proper design and planning of the local area wireless networks or WLANs, depends mainly on the accuracy of the simulation tools, with which the feasibility studies are carried out and it is in this context that the importance of having reliable propagation models is appreciated and adapted for the different environments of interest where a telecommunications system will be implemented, since by having a successful propagation model, predictions of the signal levels will be achieved with a greater degree of confidence. In the case of outdoor environments, the number of variables such as environmental, type of land, vegetation, etc., generate the need for more specific propagation models such as the "Lower Guayas River Basin" considered in the present study due to its economic and productive interest for Ecuador. The present study validates the efficacy of an empirical propagation model prepared from 310,552 measurements collected between November 2018 and July 2019 for 36 subscriber clients on the 5GHz frequency, also considering the effect that the presence of rain has on the signal levels received with the use of a weather station. The results obtained allow us to determine that the elaborated empirical propagation model has a higher level of effectiveness, for the environment and frequency considered, than several of the best-known and widely used models do.

Keywords: Telecommunications, Wireless Communications, Rural Area, Internet Service Provider, Propagation Model.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

WAN	Wide Area Network
LAN	Local Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
GHz	Giga Hertz
SUI	Stanford University Interim
ITU	International Telecommunications Union
RF	Radio Frecuencia
TIC	Tecnologías de la Información y comunicación
ISP	Internet Service Provider
HFC	Hybrid Fiber-Coaxial
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Network
ISM	Industrial, Scientific and Medical
QoS	Quality of Service
EAP	Extensible Authentication Protocol
RSSI	Received Signal Strength Indicator
NTP	Network Time Protocol

CAPÍTULO 1: Descripción del proyecto de intervención

1.1 Introducción.

A partir del desarrollo de la primera Red Local Inalámbrica (WLAN, Wireless Local Area Network) llamada ALOHAnet, en la Universidad de Hawái donde se logró interconectar 7 computadoras ubicadas en diferentes islas, las WLAN han experimentado grandes avances tecnológicos y normativos debidos principalmente al gran interés de sus aplicaciones prácticas y al impulso que posteriormente recibió con la regulación de las LAN (Local Area Network) inalámbricas bajo las normas IEEE 802.11b que inicialmente fomentó el uso de la banda de 2.4 GHz y que luego adoptó también la banda de 5 GHz con el estándar 802.11a, durante todo este proceso de actualización tecnológica y normativa se ha buscado de manera permanente explotar las ventajas de las WLAN en comunicaciones de larga distancia para áreas de difícil acceso mediante el uso de modelos de propagación, con especial énfasis en áreas rurales donde los análisis de cobertura y factibilidad se han vuelto cada vez más importantes en el proceso de implementación de estas redes.

A pesar de disponer actualmente con modelos de propagación reconocidos como Okumura-Hata, SUI (Stanford University Interim), ITU (International Telecommunication Unión), entre otros, la realidad es que cada zona geográfica cuenta con características particulares de topografía, vegetación, etc., que afectan en mayor o menor grado a la pérdida en señales de radiofrecuencia (RF) razón por la cual se requieren modelos de propagación empíricos que consideren las características del terreno ecuatoriano en donde serán implementadas las redes inalámbricas con especial énfasis a las zonas de interés económico-productivo rural y que presentan una alta demanda del servicio de acceso a internet, como es el caso de la cuenca baja del río Guayas, la cual es una zona geográfica con importante actividad productiva de banano, cacao, caña de azúcar, entre otros, con una extensión aproximada de 34.500 km² que equivale al 12,47% del territorio ecuatoriano.

El presente trabajo de investigación considera como punto de partida la tesis presentada por (Crespo, 2018) con la variante de que se han

considerado parámetros medio ambientales, considerando una mayor cantidad de clientes inalámbricos, durante un periodo de tiempo superior para la recolección de información, con lo cual se busca darle un mayor nivel de precisión al modelo de propagación empírico obtenido.

1.2 Definición del problema

En estos momentos se vive la era de las telecomunicaciones y la necesidad de acceso a las TIC ha generado una demanda que crece cada año, lo que a su vez ha ocasionado que las empresas proveedoras de servicios de internet (ISP, Internet Service Provider) se vean obligadas a mejorar de manera periódica su infraestructura a fin de cumplir con las expectativas de sus clientes, sin embargo la mala relación costo-beneficio generado por la baja densidad de clientes en cantones con menos de 100.000 habitantes, donde se concentra un tercio de la población ecuatoriana según datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2019) y las dificultades de instalación de infraestructura tecnológica basada en fibra óptica, como GPON (Gigabit-capable Passive Optical Network) o HFC (Hybrid Fiber-Coaxial) para las zonas apartadas de las cabeceras cantonales donde se ubican cerca de la mitad de la población cantonal antes mencionada (Ojeda & Vinueza, 2017), ha provocado que las redes inalámbricas o WLAN se continúen presentando como una opción técnica y económicamente viable para los ISP de zonas rurales, sin embargo estas ventajas pueden verse reducidas significativamente cuando no se cuenta con un adecuado proceso de Planificación y Dimensionamiento (PyD), etapa en la cual se realizan análisis de factibilidad, mediante el uso de software de simulación basado en modelos de propagación que permiten determinar la viabilidad técnica de las redes inalámbricas que serán implementadas, con lo cual se busca reducir la probabilidad de sobre-dimensionamiento o sub-dimensionamiento ya que en el primer caso se realizaría una inversión superior a la necesaria y en el segundo escenario no se lograría satisfacer la necesidad de los clientes lo cual generaría costos adicionales que no fueron considerados en el presupuesto del proyecto, en cualquiera de los dos casos la empresa ISP

se ve afectada por la falta de un modelo de propagación adecuado que le ayude a reducir estos riesgos.

1.3 Justificación del problema

La demanda de acceso a los servicios de telecomunicaciones en las zonas rurales de Ecuador, enfrenta a los ISP ante el reto de proporcionar internet de banda ancha, de calidad y confiable mediante el uso de tecnologías inalámbricas en las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical), donde la capacidad de predecir la factibilidad técnica de cobertura mediante el uso de herramientas que faciliten las predicciones de propagación, se vuelve cada vez más importante a medida que los clientes se alejan del área urbana donde normalmente son instalados los nodos suscriptores.

En el mercado de las telecomunicaciones se pueden encontrar varias herramientas que ayudan a calcular la pérdida en espacio libre mediante el uso de modelos de propagación, sin embargo estos están enfocados de manera prioritaria al área de telefonía celular dominado por los principales proveedores de telecomunicaciones, razón por la cual los costos para acceder a estas herramientas no resultan convenientes para los pequeños ISP de zonas rurales, también se cuenta con opciones gratuitas como Link Planner, diseñado para funcionar solo con equipos Cambium Networks y el popular Radio Mobile, no obstante estas opciones no cuentan con los suficientes estudios experimentales, ni permiten el nivel de personalización necesario para adaptarlo a las condiciones particulares de la zona geográfica considerada en este trabajo de investigación, conocida como la cuenca baja del río Guayas.

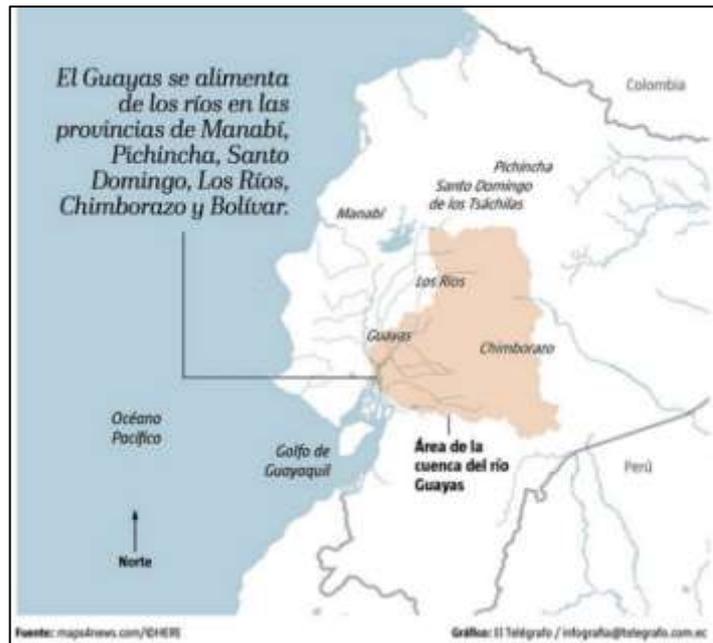


Figura 1.1. Área geográfica de la cuenca baja del río Guayas.
Fuente: (Redacción Actualidad, 2016)

La zona de estudio se encuentra localizada al suroeste del Ecuador, en la cuenca hidrográfica del Guayas, limitada al norte por el ramal de la cordillera de los Andes que separa la cuenca del Guayas con la del Esmeraldas, al sur por el Golfo de Guayaquil, al este por estribaciones de la cordillera de los Andes y al Oeste por la cordillera costera, esta zona se considera de gran importancia para el sector productivo del Ecuador en donde se concentran poblaciones cuya principal actividad económica son el cultivo de banano, caña de azúcar y cacao, lo cual ha generado una alta presencia de empresas dedicadas a proveer servicios de telecomunicaciones para áreas rurales y que se verán directamente beneficiadas por los resultados obtenidos.

Debido a esto, en el presente trabajo de investigación se busca desarrollar un modelo de propagación empírico que pueda ser usado como herramienta de cálculo de pérdida en espacio libre y simulación de propagación aplicable a zonas geográficas con características similares a la “Cuenca baja del río Guayas”.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Validar un modelo de propagación empírico, considerando variables ambientales, para las áreas rurales de la cuenca baja del río Guayas en la frecuencia de 5 GHz.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Instalar una estación meteorológica que permita cuantificar las diferentes variables ambientales que podrían influir en el modelo de propagación que se pretende validar.
- Recolectar información ambiental y de niveles de señal recibida de los diferentes clientes inalámbricos instalados en el sector de La Troncal.
- Realizar una aproximación mediante software del modelo de propagación empírico, usando la información recolectada de los clientes inalámbricos.
- Validar la efectividad del modelo de propagación empírico resultante mediante una comparación gráfica de las mediciones reales obtenidas de los clientes frente a varios modelos de propagación conocidos.

1.5 Hipótesis

La validación de un modelo de propagación considerando variables ambientales permitirá a los proveedores de internet rural, que proveen servicios en la zona denominada “cuenca baja del río Guayas”, realizar análisis de factibilidad para las instalaciones de redes y enlaces inalámbricos con mayor precisión.

1.6 Metodología de la Investigación

El presente trabajo plantea un método de investigación Exploratorio-Descriptivo debido a que se realiza una recopilación de la información referente al diseño y validación de un modelo de propagación empírico así como los factores relevantes que afectan a los sistemas de comunicaciones inalámbricas estableciendo de esta forma el Estado del Arte de los mismos, también se emplea el método de investigación Empírico-Analítico con un enfoque Cuantitativo debido a que a través de la experiencia y observación que se realiza a los nodos de radio frecuencia actualmente instalados en La Troncal, se logra realizar una recolección de datos de los niveles de señal permitiendo luego aplicar el método Estadístico-Descriptivo para organizar los datos recolectados y realizar una aproximación lineal mediante software que permita generar un modelo de propagación empírico que simplifique el cálculo de la pérdida por recorrido aplicable a la Cuenca Baja del Río Guayas, finalmente se emplea el método comparativo ya que se somete a validación el modelo de propagación empírico resultante con los principales modelos existentes.

CAPÍTULO 2: Principales aspectos de la propagación en exteriores para las redes WLAN

2.1 Propagación de redes WLAN en exteriores.

Las redes WLAN basan su funcionamiento en la transmisión de ondas de radiofrecuencia para enviar y recibir información, lo cual permite realizar despliegues con una cobertura considerablemente mayor que en redes basadas en un medio físico como cable Coaxial, UTP o fibra óptica, esto ha permitido la implementación rápida de redes inalámbricas en áreas rurales donde los ISP han logrado proveer de conectividad simplificada a sus clientes con una topología básica como se puede ver en la Figura 2.1 mediante el uso de bandas de frecuencia ISM de libre uso o no licenciadas, las mismas que están comprendidas entre los 2,4 GHz y 5,8 GHz.

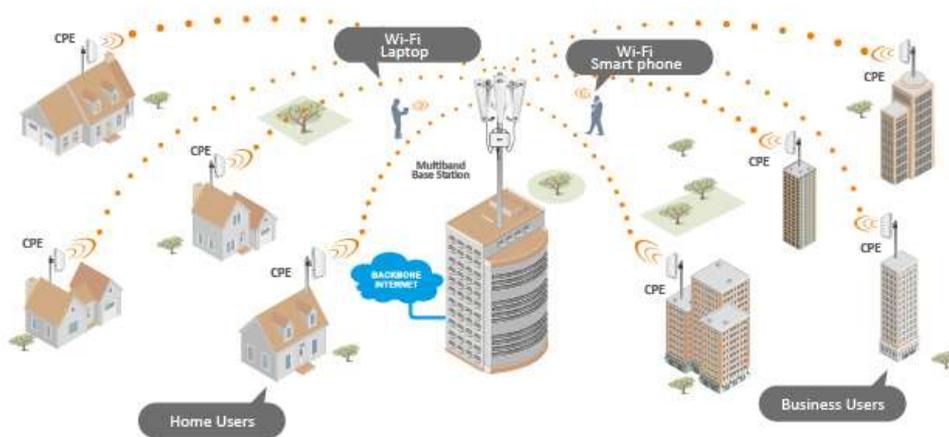


Figura 2.1. Topología básica de red WLAN entre ISP - Cliente.
Fuente: (NETKROM GROUP, 2019)

Las capacidades en tasa de transmisión y cobertura de las WLAN varían en función de diferentes factores como su frecuencia de trabajo, tecnología utilizada, codificación de señales, etc., sin embargo el objeto de este estudio se enfoca en la pérdida por recorrido originado por variables directamente relacionadas con el tipo de terreno, vegetación, distancia entre antenas y variables ambientales, para esto es importante recapitular los principales factores que inciden en la propagación de una señal RF que se verá a continuación.

2.1.1 Perdidas por recorrido en espacio libre.

Se define como perdida por recorrido en espacio libre a la atenuación que sufre una onda electromagnética al propagarse en línea recta, en un espacio vacío, donde no se sufre afectación o interferencia originada por algún objeto cercano, sin embargo esta definición no es muy acertada ya que lo que realmente ocurre no es una pérdida de señal sino una reducción de densidad de potencia en el área de la antena receptora lo cual es consecuencia de la dispersión de la onda electromagnética emitida (Tomasi, 2003), debido a esto se considera que un término más adecuado sería “Perdida por Dispersión”, la ecuación que lo define es la siguiente:

$$L_p = \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi D f}{c} \right)^2 \quad (2.1)$$

Donde:

- L_p = Perdida por recorrido en espacio libre (adimensional).
- D = Distancia (Kilómetros).
- f = Frecuencia (Hertz).
- λ = Longitud de Onda (metros).
- c = Velocidad de la Luz (3×10^8 m/s)

Expresado en decibeles, obtendríamos como ecuación resultante:

$$L_{p(dB)} = 92,4 + 20 \log f_{(GHz)} + 20 \log D_{(Km)} \quad (2.2)$$

2.1.2 Absorción.

Las moléculas de algunos materiales en estado gaseoso, líquido o sólido que se encuentran presentes en la atmósfera terrestre, tienen la capacidad de absorber las ondas electromagnéticas lo cual causa atenuaciones en el campo magnético y niveles de voltaje equivalente a una reducción en la densidad de potencia de las señales transmitidas, ésta pérdida por absorción en una atmósfera normal depende únicamente de la frecuencia de la señal y su efecto es prácticamente nulo para frecuencias inferiores a los 10GHz como se observa en la Figura 2.2 (Tomasi, 2003).

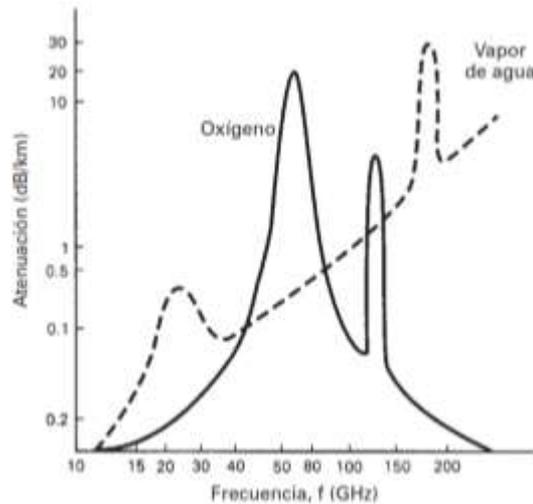


Figura 2.2. Curva de coeficiente de absorción η .
Fuente: (Tomasi, 2003)

Para frecuencias superiores a 10GHz se pueden apreciar picos y valles en el comportamiento de sus curvas a medida que incrementa la frecuencia de trabajo, cabe indicar que para un atmósfera anormal como neblina o lluvia intensa, la pérdida por absorción puede llegar a tener un mayor impacto sobre el presupuesto energético de la señal transmitida (Tomasi, 2003).

La pérdida en dB por absorción atmosférica η viene dada por la ecuación:

$$\eta = \gamma(R_2 - R_1) \quad (2.3)$$

Donde:

- γ = Coeficiente de Absorción (dB/m).
- $R_2 - R_1$ = Distancia entre R_2 y R_1 (Kilómetros).

2.1.3 Refracción.

El efecto de refracción de una onda electromagnética se manifiesta como el cambio en la dirección y velocidad de un rayo oblicuo a la superficie de un nuevo medio de propagación con distinta densidad como se observa en la Figura 2.3.

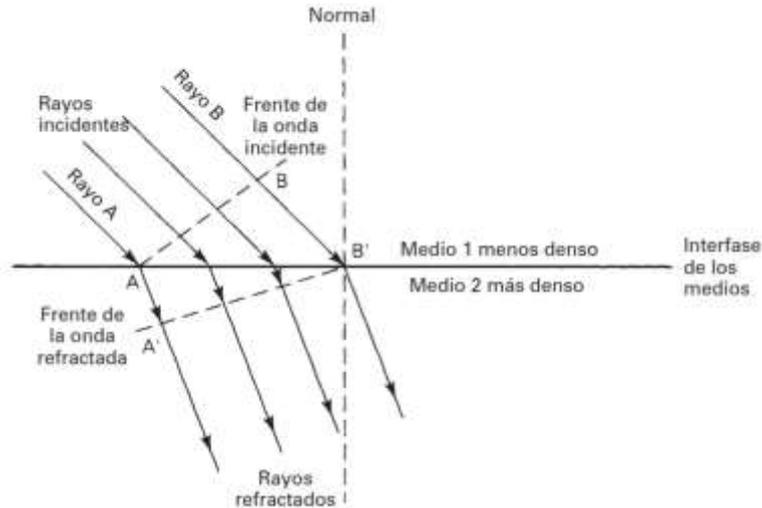


Figura 2.3. Refracción de una frontera entre dos medios.
Fuente: (Tomasí, 2003).

El nivel de flexión que existe entre dos diferentes materiales se puede predecir con facilidad y depende directamente del índice de refracción de cada material mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

Donde:

- n_1 = Índice de refracción para el medio 1.
- n_2 = Índice de refracción para el medio 2.
- θ_1 = Angulo de rayo incidente (grados).
- θ_2 = Angulo de rayo refractado (grados).

2.1.4 Reflexión.

La reflexión electromagnética se presenta cuando un frente de onda choca contra una frontera entre dos medios con diferentes densidades pero a diferencia de la refracción, durante la reflexión toda o casi toda la potencia de la onda incidente no entra o rebota como se aprecia en la Figura 2.4, debido a esto se mantiene la velocidad de la onda incidente y el ángulo de reflexión son los mismos que los de la onda incidente pero si se presenta una reducción en la intensidad del campo de voltaje respecto al voltaje incidente.

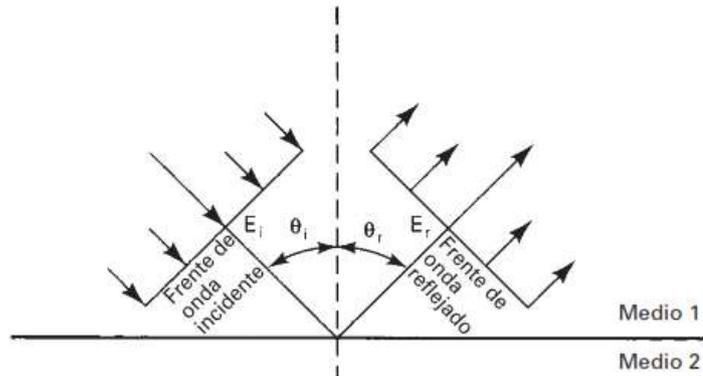


Figura 2.4. Reflexión de una onda electromagnética entre dos medios.
Fuente: (Tomasi, 2003)

La relación resultante entre la intensidad de voltaje incidente y reflejado se conoce como coeficiente de reflexión y se puede determinar con la ecuación:

$$\Gamma = \frac{E_r e^{j\theta_r}}{E_i e^{j\theta_i}} = \frac{E_r}{E_i} = e^{j(\theta_r - \theta_i)} \quad (2.5)$$

Donde:

- Γ = coeficiente de reflexión (adimensional).
- E_i = intensidad de voltaje incidente (volts).
- E_r = intensidad de voltaje reflejado (volts).
- θ_i = Fase de ángulo incidente (grados).
- θ_r = Fase de ángulo reflejado (grados).

2.1.5 Difracción.

La difracción es la redistribución de la energía que ocurre cuando un frente de onda pasa cerca de las orillas de un obstáculo originando un desvío en la dirección de propagación de las ondas electromagnéticas, este fenómeno es el que facilita la propagación de ondas luminosas o electromagnéticas en torno a esquinas, mejor conocido como efecto filo de cuchilla.

Para el análisis de la difracción de ondas electromagnéticas es necesario recurrir al principio de Huygens, el cual establece que todo punto sobre un determinado frente de onda se puede considerar como una fuente secundaria de ondas electromagnéticas tal como se observa en la Figura 2.5.



Figura 2.5. Difracción de ondas electromagnéticas – Efecto filo de cuchilla.
Fuente: (Tomasí, 2003)

2.2 Principales Características del Estándar 802.11.

Cuando se habla de Wi-Fi o WLAN usualmente se hace referencia al conocido estándar 802.11 el cual es realmente un conjunto de especificaciones para la utilización de la capa física y de control de acceso del modelo OSI (Open System Interconnection) (Anguís, 2008), el cual facilita la interoperabilidad de equipos dentro de una red WLAN en las frecuencias 2,4 GHz y 5 GHz que en los últimos años han sido adoptadas de forma masiva por los usuarios, esta adopción se ha debido principalmente a que el estándar IEEE 802.11 fue el primero en ser abierto al mercado con lo cual ha logrado convertirse en la tecnología más utilizada para acceso inalámbrico desde su publicación en 1997 demostrando su capacidad para cumplir con las necesidades de conectividad inalámbrica en diversos entornos y aplicaciones a precios muy asequibles (Camargo, 2018).

Desde la publicación del estándar 802.11 una gran número de organismos internacionales se interesaron en establecer un protocolo que asegure la compatibilidad e interoperabilidad de equipos con capacidad de comunicación inalámbrica y es de esta manera que con el pasar de los años este protocolo ha ido evolucionando tal como se ve en la Tabla 2.1 (Camargo, 2018).

Tabla 2.1: Comparativa y Evolución de los Estándares IEEE 802.11

	802.11 legacy	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	802.11ac (Wave 1/Wave 2)
Banda	2.4GHz / 850-950nm	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	2.4GHz	5GHz
Capa Física	FHSS / DSSS / IR GFSK / DPSK	DSSS DPSK sin/con CCK o PBCC	OFDM PSK / QAM	DSSS / OFDM DPSK / PSK / QAM	MIMO / OFDM	Wave 1: SI-MIMO / OFDM Wave 2: MU-MIMO / OFDM
Tasa máxima	2 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps	600 Mbps	Wave 1: 1.3Gbps Wave 2: 2.34 - 3.47 Gbps
Alcance interior	20m	40m	35m	40m	70m	35m
Alcance exterior	100m	150m	120m	150m	300m	120m
Publicacion	1997	1999	1999	2003	2008	2012
Compatibilidad		No compatible con 802.11a	No compatible con 802.11b	No compatible con 802.11b	Compatible con todos	No compatible con 802.11b

Fuente: Elaborado por el Autor.

Además de los protocolos indicados en la Tabla 2.1 que se enfocan en la interoperabilidad y mejora de las capacidades de las comunicaciones inalámbricas en las WLAN, existen también varios grupos de investigación dentro del estándar 802.11 que se encargan de desarrollar protocolos que buscan complementar en los ámbitos de seguridad, compatibilidad, calidad de servicio, etc., a los protocolos antes mencionados, entre estos se tiene los siguientes (Anguís, 2008):

- **IEEE 802.11c:** Estipula las características y condiciones de los puntos de acceso para que estos puedan ser utilizados como puentes de comunicaciones.
- **IEEE 802.11x:** Busca la mejora de los parámetros de seguridad de las redes WLAN mediante el uso de protocolos de seguridad extendida (EAP).
- **IEEE 802.11h:** Se presenta como una evolución de estándar 802.11a y permite la asignación dinámica de canales con la capacidad de controlar los niveles de potencia de irradiación para reducir la probabilidad de interferencias.
- **IEEE 802.11e:** Coordina la implementación de las características de Calidad de Servicio (QoS).
- **IEEE 802.11d:** Establece los requisitos y condiciones para que el estándar 802.11 funcione en países que actualmente no lo permiten.

2.3 Principales Modelos de propagación usados en redes WLAN.

Desde los inicios de las comunicaciones inalámbricas una de las principales preocupaciones ha sido la de contar con la capacidad de predecir el comportamiento de las señales irradiadas en un entorno de red WLAN en particular, ya sea este Indoor, Outdoor, Urbano o Rural.

Con la intención de cubrir esta necesidad se desarrollaron los conocidos modelos de propagación con los cuales se logra predecir las pérdidas de potencia en diferentes entornos, algunos de estos modelos de propagación se basan en modelo probabilísticos y otros en análisis de miles de mediciones que luego son promediadas con lo cual se logra aproximar, con un modelo matemático, la curva de pérdida dependiendo de las diferentes variables de interés como distancia, frecuencia de trabajo, condiciones geográficas, etc. Gracias a esto, cada modelo de propagación desarrollado responde a las necesidades de predicción para un ecosistema en particular por lo que existe una gran cantidad de modelos de propagación disponibles, de entre los cuales se analiza algunos de los modelos de propagación más populares a continuación.

2.3.1 Modelo de Young.

Uno de los más conocidos modelos de propagación es el elaborado por Young en el año 1952 mediante mediciones realizadas en la ciudad de New York, este modelo considera la existencia de edificaciones altas, lo cual es una característica importante en áreas urbanas y ciudades con densa población. Los resultados obtenidos por Young son aplicables para señales con frecuencia de trabajo entre 150 MHz y 3,7 GHz y su ecuación para determinar la pérdida por recorrido está dada por (Tirado & Muñoz, 2016):

$$L (dB) = -G_{eb} - G_m - 20\log(h_{eb}) - 20\log(h_m) + 40\log(d) + \beta \quad (2.6)$$

Donde:

- G_{eb} = Ganancia de antena en Radio Base (dBi).
- G_m = Ganancia de antena en cliente móvil (dBi).
- h_{eb} = Altura de antena en Radio Base (m).
- h_m = Altura de antena en cliente móvil (m).
- β = Factor dependiente de la densidad de edificios.

Los valores de β varían dependiente de la frecuencia de trabajo, ya sea esta 150 MHz, 450 MHz o 900 MHz, y de la densidad de edificios con un valor típico de 25dB para grandes centros urbanísticos en la frecuencia de 150 MHz, cabe indicar que en el modelo de propagación de Young se puede observar que la pérdida por recorrido calculada, en terrenos planos y sin obstáculos, es similar a modelos tradicionales cuando se utiliza un $\beta = 4$ (Tirado & Muñoz, 2016).

2.3.2 Modelo de Lee.

El modelo de Lee fue elaborado para terreno plano con alto índice de imprecisiones para terreno no plano por lo cual es considerado el modelo de Norteamérica y viene dado por la siguiente ecuación (Seybold, 2013):

$$L_{dB} = -10\log(\mu_{\Omega_0}) + 10\gamma\log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 10n\log\left(\frac{f}{f_c}\right) - 10\log F_A \quad (2.7)$$

Donde:

- μ_{Ω_0} = Potencia a 1,6 km del Emisor
- γ = Coeficiente de perdida de potencia en base a distancia
- d = Distancia entre Emisor y Receptor.
- d_0 = Distancia de referencia (1,6 km).
- n = Coeficiente variable en función de frecuencia y entorno.
- f = Frecuencia de trabajo.
- f_c = Frecuencia de referencia (900 MHz).
- $F_A = F_{h_{eb}} F_{h_m} F_{P_T} F_{G_{eb}} F_{G_m}$

Donde:

$$\begin{cases} F_{h_{eb}} = \left[\frac{h_{eb}}{30,48}\right]^2 \\ F_{h_m} = \left[\frac{h_m}{3}\right]^\beta \\ F_{P_T} = \left[\frac{P_T}{10}\right]^2 \\ F_{G_{eb}} = \left[\frac{G_{eb}}{4}\right]^2 \\ F_{G_m} = [G_m] \end{cases} \quad \therefore \begin{cases} h_{eb} = \text{altura de estacion base (m)} \\ h_m = \text{altura de estacion movil (m)} \\ P_T = \text{potencia del transmisor (W)} \\ G_{eb} = \text{ganancia de antena base} \\ G_m = \text{ganancia de antena movil} \end{cases}$$

$$n = \begin{cases} 2 & \text{para } f_c < 450\text{MHz y area suburbana/area abierta} \\ 3 & \text{para } f_c > 450\text{MHz y area urbana} \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} 2 & \text{para } h_m < 10m \\ 3 & \text{para } h_m > 3m \end{cases}$$

Además los parámetros μ_{Ω_0} y γ se ajustan dependiendo de las características del terreno como se especifica en la Tabla 2.2 (Seybold, 2013).

Tabla 2.2: Parámetros de terreno para modelo de propagación de Lee.

Terreno	$\mu\Omega_0$	γ
Espacio libre	-45,0	2,00
Área abierta	-49,0	4,35
Suburbano (Norteamérica)	-61,7	3,84
Urbano (Norteamérica)	-70,0	3,68
Urbano (Norteamérica)	-64,0	4,31
Urbano (Japón)	-84,0	3,05

Fuente: (Seybold, 2013).

2.3.3 Modelo Okumura-Hata.

Este modelo de propagación se basa en el elaborado por Okumura en 1980, aplicable para áreas urbanas en las frecuencias desde 200 MHz hasta los 2 GHz, para esto Hata convirtió la información gráfica, presentada en el modelo de Okumura, en una serie de ecuaciones con la finalidad de simplificar su utilización de forma práctica, dando como resultado el siguiente modelo (Seybold, 2013):

$$L = A + B \log d + C \quad (2.8)$$

Dónde:

- $A = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_1) - a(h_2)$
- $B = (44,9 - 6,55 \log(h_1)) \log(d)$
- f = Frecuencia de operación (150 MHz a 1500 MHz)
- h_1 = Altura de antena Emisora (30 – 200m)
- h_2 = Altura de antena Receptora (1 -10 m)
- d = Distancia Transmisor – Receptor (1 a 20 Km)
- C = Depende de la frecuencia y de las características del terreno.

De esta forma se tiene para áreas urbanas:

- Ciudades grandes

$$a(h_2) = \begin{cases} 8,29[\log(1,54(h_2))]^2 - 1,1; & f < 300MHz \\ 3,2[\log(11,75(h_2))]^2 - 4,97; & f \geq 300MHz \end{cases} \quad \text{y } C = 0 \quad (2.9)$$

- Ciudades medianas y pequeñas

$$a(h_2) = [1,1\log(f) - 0,7]h_2 - [1,56\log(f) - 0,8] \quad y \quad C = 0 \quad (2.10)$$

- Áreas suburbanas:

$$C = -2\left[\log\left(\frac{f}{28}\right)\right]^2 - 5,4 \quad (2.11)$$

- Áreas rurales o abiertas:

$$C = -4,78[\log(f)]^2 + 18,33\log(f) - 40,98 \quad (2.12)$$

2.3.4 Modelo SUI (Stanford University Interim).

El modelo Stanford University Interim (SUI) fue propuesto por Erceg y un grupo de colaboradores ligados con el Instituto de Standford, este modelo de propagación es básicamente una extensión del modelo Okumura-Hata hasta frecuencias cercanas a los 2GHz y que posteriormente en su versión extendida le fue añadido un coeficiente de compensación con lo cual el modelo se puede utilizar para frecuencias superiores a los 2 GHz.

Debido a que se trata de un modelo de propagación empírico es necesario especificar el tipo de terreno sobre el cual se efectúa el cálculo de pérdida por recorrido considerando uno de los siguientes escenarios (Tirado & Muñoz, 2016):

- **Grupo A:** Registra los mayores niveles de pérdida por ser terreno montañoso o con colinas con mucha vegetación.
- **Grupo B:** Pérdida por recorrido intermedia con terreno que presenta alta presencia de árboles y zonas montañosas pero con poca vegetación.
- **Grupo C:** presenta poca pérdida propia de territorios llanos y con poca o nula presencia de vegetación.

La ecuación que define al modelo de propagación SUI viene dada por la siguiente expresión (Tirado & Muñoz, 2016):

$$L_{(dB)} = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + Xf = Xh \quad \therefore \text{para } d > d_0 \quad (2.13)$$

Donde:

$$\begin{cases} A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) & \text{y } \gamma = a - bh_{te} + \frac{c}{h_{te}} \\ Xf = 6.0 \log\left(\frac{fc}{2000}\right) \\ Xh = -10.8 \log\left(\frac{h_{re}}{2000}\right) & \therefore \text{para area Grupo A y Grupo B} \\ Xh = -20 \log\left(\frac{h_{re}}{2000}\right) & \therefore \text{para area Grupo C} \end{cases}$$

- $d_{(m)}$ = Separación entre Radio Base y Cliente Móvil.
- d_0 = Valor fijo de 100 metros.
- $X_{f(dB)}$ = Factor de corrección para frecuencias mayores a 2 GHz.
- $X_{h(dB)}$ = Factor de corrección para altura de antena receptora.
- $f_{c(MHz)}$ = Frecuencia de trabajo.
- λ = Longitud de onda, en metros; $f \leq 2000$ MHz
- γ = Exponente de pérdidas.
- a, b y c = Factores dependientes del tipo de terreno en base a la siguiente Tabla 2.3:

Tabla 2.3: Valores de clasificación del terreno para Modelo SUI.

	Grupo A	Grupo B	Grupo C
Valor a	4,6000	4,0000	3,600
Valor b	0,0075	0,0065	0,005
Valor c	12,6000	17,1000	20,000

Fuente: (Tirado & Muñoz, 2016).

2.3.5 Modelo Venezuela-Colombia.

El modelo Venezuela-Colombia se basa en las mediciones obtenidas de redes WLAN implementadas en ambientes exteriores de las ciudades de Mérida y Cúcuta ubicadas en Venezuela y Colombia respectivamente, la frecuencia de trabajo aplicada fue de 2,4GHz, este modelo de propagación considera 3 diferentes ambientes exteriores los cuales están definidos por las siguientes ecuaciones (Pérez, Herrera, Uzcátegui, & Peña, 2012):

- Áreas urbanas:

$$L(dB) = 51,01 + 22,59 \log d \quad (2.14)$$

Donde “d” es la distancia entre Antena Emisor y Receptor (metros).

- Áreas suburbanas:

$$L(dB) = 48,73 + 22,59 \log d \quad (2.15)$$

- Áreas abiertas:

$$L(dB) = 51,93 + 22,59 \log d \quad (2.16)$$

El modelo Venezuela-Colombia presenta respuestas confiables considerando principalmente alturas de antena emisora y receptora de 3 y 1 metro respectivamente, con distancia entre de ellas de 5 a 150 metros, debido a esto su aplicación práctica se limita a redes WLAN de Campus, parques, urbanizaciones, etc. (Pérez, Herrera, Uzcátegui, & Peña, 2012).

CAPÍTULO 3: Recolección de mediciones en ambientes exteriores.

En esta sección se detalla la metodología empleada para la recolección de las mediciones de los niveles de señal utilizados para la validación del modelo de propagación empírico, las especificaciones técnicas de los equipos transmisor y receptor, valores de configuración considerados y recolección de información ambiental para elaborar el cruce de variables identificando temporadas con presencia de lluvia para un posterior análisis comparativo.

La recolección de mediciones tanto para los niveles de señal como de las condiciones ambientales y presencia de lluvia se han efectuado en conjunto desde el 19 de noviembre del 2018 hasta el 18 de julio del 2019 con una periodicidad de 7 a 10 días aproximadamente para 36 sitios actualmente operativos con lo cual se han logrado recopilar un total de 310.552 muestras.

3.1 Zona Geográfica considerada para recolección de mediciones.

La zona de interés del presente estudio es la “Cuenca baja del río Guayas” la misma que concentra a una gran cantidad de productores agrícolas, camaroneros y ganaderos que gracias a su actividad económica han convertido a esta zona geográfica en una de las de mayor interés productivo originando una alta demanda de servicios de acceso a internet que es cubierta principalmente por los ISP rurales del sector.

La recolección de mediciones se realiza tomando como punto central el cerro Huaquillas ubicado en la cabecera cantonal de La Troncal, provincia del Cañar, el cual se encuentra dentro de la zona de interés antes mencionada y que presenta las características típicas que se requieren considerar dentro del presente trabajo como sembríos de caña de azúcar, banano y abundante vegetación.

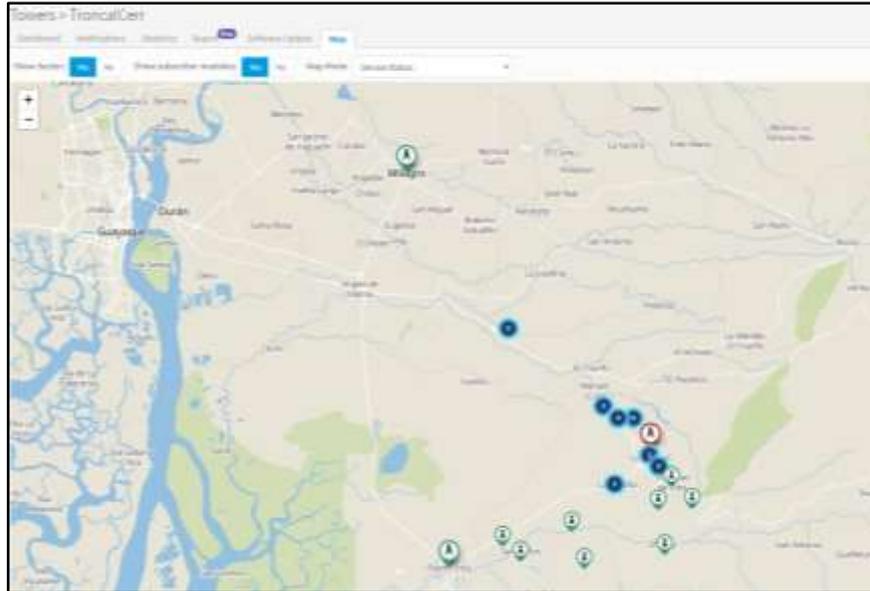


Figura 3.1. Enlaces inalámbricos La Troncal – Mapa cnMaestro
Fuente: Adaptado de (Cambium Networks, 2016).

3.2 Hardware usado para recolección de datos.

Para la recolección de datos se aprovechará la red inalámbrica, basada en equipos Cambium Networks, actualmente instalada en La Troncal, cuyo nodo transmisor se encuentra en el cerro Huaquillas donde se consolidan los 36 clientes inalámbricos que serán considerados en el presente trabajo, cabe indicar que a pesar de las características geográficas del terreno, todos los enlaces inalámbricos cumplen con los siguientes parámetros de funcionamiento:

- Topología Punto a Multipunto.
- Línea de vista entre Transmisor-Receptor.
- Primera zona de Fresnel sin obstáculos.
- Distancias Transmisor-Receptor variable de 200 m a 27 Km.
- Enlaces inalámbricos situados en área rural con alto índice de vegetación.

3.2.1 Equipo Transmisor.

El equipo transmisor está compuesto por 3 antenas sectoriales de la marca Cambium Networks modelo PMP 450m AP, las mismas se encuentran instaladas sobre la torre principal del nodo Huaquillas en las coordenadas -79.341860, -2.416470 para longitud y latitud respectivamente, que corresponden a la cabecera cantonal de La Troncal.

Los equipos transmisores cuentan con acople directo hacia la antena sectorial con lóbulo de radiación de 90° y polaridad dual, tal como se puede observar en la Figura 3.2, esta característica permite eliminar la pérdida en el cable y acople mecánico hacia la antena por lo cual está pérdida no será considerada en el cálculo de EIRP (Effective Isotropic Radiated Power).



Figura 3.2. Access Point Cambium Networks PMP450m con antena integrada de 90°. Fuente: (Cambium Networks, 2016).

Los equipos instalados en nodo transmisor presentan las siguientes características de montaje y configuración:

Tabla 3.1: Características de montaje y configuración de equipo transmisor.

Nombre	Modelo	Frecuencia de trabajo	Ancho de canal	Azimuth	Potencia máxima	Ganancia de Antena
SEC1	PMP 450m	5865 MHz	20 MHz	345°	+24 dBm	+14 dBi
SEC2	PMP 450m	5835 MHz	30 MHz	250°	+24 dBm	+14 dBi
SEC3	PMP 450m	5875 MHz	20 MHz	160°	+24 dBm	+14 dBi

Fuente: (Cambium Networks, 2016)

3.2.2 Equipo Receptor.

Los equipos Cambium Network utilizados para los módulos suscriptores o clientes receptores, corresponden a las series PMP 450i y PMP 450b que se pueden apreciar en la Figura 3.3, estos equipos cuentan con presentaciones de media y alta ganancia las cuales han sido seleccionadas dependiendo de las necesidades particulares de cada cliente para asegurar una conectividad aceptable para transmisión de datos.



Figura 3.3. Modulo Suscriptor Cambium Networks PMP450b y PMP450i.
Fuente: (Cambium Networks, 2016)

Debido a que se han usado diferentes modelos para los equipos receptores es necesario identificar las diferencias en las ganancias de sus antenas con la finalidad de realizar un cálculo de EIRP personalizado para cada cliente receptor y evitar que estas variaciones afecten la interpretación de las lecturas de niveles de señal recibida.

Adicionalmente fue necesario realizar un levantamiento de información de las distancias entre el equipo transmisor y cada uno de los clientes receptores ya que este dato será de gran importancia en la determinación del modelo de propagación empírico que se realizará posteriormente, la información recopilada se puede observar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Información de suscriptores PMP450 conectados con Nodo Cerro Huaquillas.

Transmisor	Ubicación	Modelo Suscriptor	Ganancia de Antena (dBi)	Distancia de Suscriptor (Km)
SEC1 ^a	Sitio 1	PMP 450b Mid-Gain SM ^b	16	4,94
SEC3	Sitio 2	PMP 450b Mid-Gain SM	16	4,03
SEC1	Sitio 3	PMP 450b High Gain SM	23	5,38
SEC1	Sitio 4	PMP 450i SM	23	12,06
SEC3	Sitio 5	PMP 450b Mid-Gain SM	16	1,48
SEC1	Sitio 6	PMP 450b Mid-Gain SM	16	7,85
SEC1	Sitio 7	PMP 450b Mid-Gain SM	16	4,14
SEC1	Sitio 8	PMP 450i SM	34	21,18
SEC3	Sitio 9	PMP 450b Mid-Gain SM	16	1,56
SEC1	Sitio 10	PMP 450b Mid-Gain SM	16	0,22
SEC2	Sitio 11	PMP 450i SM	34	12,25
SEC1	Sitio 12	PMP 450b High Gain SM	23	3,36
SEC3	Sitio 13	PMP 450b High Gain SM	23	5,90
SEC1	Sitio 14	PMP 450b Mid-Gain SM	16	4,74
SEC3	Sitio 15	PMP 450b High Gain SM	23	3,70
SEC1	Sitio 16	PMP 450b High Gain SM	23	15,66
SEC3	Sitio 17	PMP 450i SM	34	14,67
SEC1	Sitio 18	PMP 450b Mid-Gain SM	16	4,79
SEC3	Sitio 19	PMP 450b Mid-Gain SM	16	6,03
SEC3	Sitio 20	PMP 450i SM	23	0,87
SEC3	Sitio 21	PMP 450b Mid-Gain SM	16	1,15
SEC1	Sitio 22	PMP 450b Mid-Gain SM	16	5,03
SEC1	Sitio 23	PMP 450b High Gain SM	23	3,76
SEC1	Sitio 24	PMP 450i SM	23	3,84
SEC3	Sitio 25	PMP 450b Mid-Gain SM	16	1,05
SEC1	Sitio 26	PMP 450b Mid-Gain SM	16	5,67
SEC3	Sitio 27	PMP 450i SM	30	18,70
SEC1	Sitio 28	PMP 450i SM	30	5,63
SEC1	Sitio 29	PMP 450b Mid-Gain SM	16	4,27
SEC1	Sitio 30	PMP 450i SM	34	21,4
SEC1	Sitio 31	PMP 450b High Gain SM	23	7,76
SEC1	Sitio 32	PMP 450i SM	32	26,45
SEC1	Sitio 33	PMP 450i SM	30	18,01
SEC3	Sitio 34	PMP 450b High Gain SM	23	8,06
SEC1	Sitio 35	PMP 450b Mid-Gain SM	16	3,84
SEC3	Sitio 36	PMP 450i SM	32	11,11

Fuente: Extraído de sistema de monitoreo cnMaestro (Cambium Networks, 2016)

^a Nodo de Cerro Huaquillas se compone por 3 equipos receptores con diferente Azimut por lo cual entre los 3 sectoriales se consigue cobertura total.

^b Dependiendo del modelo de equipo suscriptor se cuenta con antena de mayor o menor ganancia lo cual debe ser considerado dentro del cálculo de modelo de propagación.

3.3 Estación meteorológica utilizada para mediciones ambientales.

Debido a que durante el desarrollo del modelo de propagación empírico se consideraran variables ambientales, resulta necesario realizar una recolección, en paralelo a los niveles de señal registrados en los clientes receptores, de los índices de lluvia registrados en la zona donde se

encuentran instalados los equipos transmisores y receptores para luego realizar un cruce de variables que permita dar como resultado un modelo de propagación que se ajuste a los efectos que estas variaciones ambientales puedan tener sobre los niveles de atenuación registrados. Para recolectar esta información ambiental se procedió con la instalación de una estación de vigilancia meteorológica de la marca Ambient Weather modelo WS-1401-IP, en la misma ubicación del nodo transmisor del cerro Huaquillas.



Figura 3.4. Estación de vigilancia meteorológica WS-1401-IP.
Fuente: (Ambient Weather, 2019).

La estación meteorológica WS-1401-IP es un modelo con capacidad de conectividad inalámbrica entre el arreglo de sensores y su base de recolección de datos, además cuenta con alimentación mediante energía solar gracias a que cuenta con un supercapacitor para el almacenamiento de energía durante el día y en la noche se alimenta de baterías tipo AA no recargables de alto desempeño, estas características le permiten un alto nivel de autonomía en áreas de difícil acceso.

La estación meteorológica cuenta con un arreglo de sensores que combina temperatura, presión atmosférica, cantidad de lluvia, humedad, entre otros, de los cuales se puede observar su detalle en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Características de sensores disponibles en Estación Meteorológica WS-1401.

Sensor	Tipo	Rango	Exactitud	Resolución
Temperatura 1	Interior	0 a 60 °C	± 1,11 °C	0,056 °C
Temperatura 2	Exterior	-40 a 60 °C		
Humedad 1	Interior	10 a 99%	± 5%	1%
Humedad 2	Exterior	10 a 99%	± 5%	1%
Presión Atmosférica	Exterior	224,79 a 825,5 mmHg	2 mmHg	0.254 mmHg
Radiación Solar	Exterior	0 a 400Klux	± 15%	1 Lux
Rango UV	Exterior	0 a 15	± 1	1
Índice de Lluvia	Exterior	0 a 10007 mm	± 10%	0.254 mm
Dirección de viento	Exterior	0 - 360°	± 1°	1°
Velocidad de viento	Exterior	0 to 160 kph	± 3,54 kph	0,16 kph

Fuente: (Ambient Weather, 2019).

La estación meteorológica se conecta inalámbricamente con la base recolectora de información usando la frecuencia de 915MHz y ésta a su vez permite conectividad basada en protocolo TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), hacia la nube de Ambient Weather y Weather Underground en donde se almacena, visualiza y gestiona la información recolectada por los diferentes sensores. Toda la información recolectada es accesible mediante la web de Ambient Weather desde donde se podrá también generar reportes, en formato CSV (Comma-Separated Values), cada 7 días en promedio, con una resolución de 60 minutos, es decir que se tendrán 24 lecturas de los niveles de lluvia por cada día.

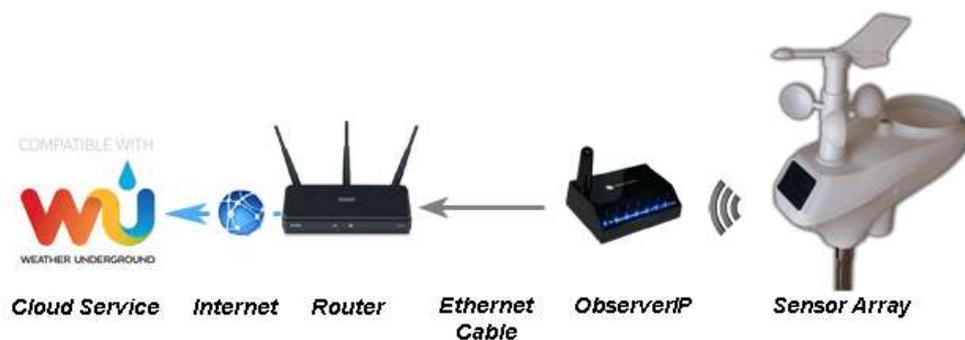


Figura 3.5. Proceso de conectividad de Estación Meteorológica WS-1401-IP.

Fuente: (Ambient Weather, 2019).

3.4 Software empleado para recolección de niveles de señal.

Para la recolección de los niveles de señal se aprovechará las capacidades de los equipos Cambium Networks instalados en cada uno de los 36 sitios receptores, donde se cuenta con módulos suscriptores PMP 450b y PMP 450i, estos equipos cuentan con la capacidad de comunicarse mediante protocolo SNMP con la plataforma web del mismo fabricante llamada cnMaestro la cual permite configurar y monitorear de manera remota todos los equipos contemplados en el presente trabajo.



Figura 3.6. Dashboard de administración cnMaestro Equipo transmisor - SEC1.
Fuente: (Cambium Networks, 2016).

Esta plataforma permite también la opción de recopilar, almacenar y exportar en formato CSV la información referente a los niveles de señal recibida de cada equipo receptor además de muchas otras opciones como se puede observar en la Figura 3.7.

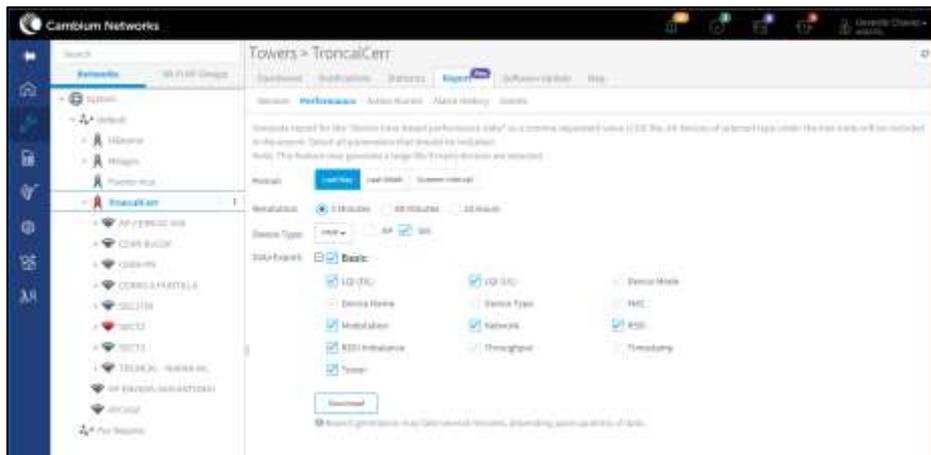


Figura 3.7. Dashboard de reporte "Performance" cnMaestro.
Fuente: (Cambium Networks, 2016).

Entre la información obtenida del sistema de generación de reportes de cnMaestro se utilizará la opción “Reportes de desempeño” la misma que permite unificar los campos de información mínima necesaria para el presente trabajo, que se detalla en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4: Campos disponibles en reportes “Performance” de cnMaestro

Campo	Descripción	Unidad
LQI (DL)	Indicador de Calidad de Downlink	0-100
LQI (UL)	Indicador de Calidad de Upwmlink	0-100
Device Name	Nombre del dispositivo	N/A
Modulation	Tipo de modulación utilizada	N/A
RSSI	Indicador de fuerza de señal recibida	dBm
RSSI Imbalance	Desequilibrio de RSSI	N/A
Tower	Torre de instalación	N/A
Device Type	Tipo de dispositivo	N/A
Network	Red a la que pertenece el dispositivo	N/A
Throughput	Rendimiento de canal.	Kbps
Device Mode	Modo de operación del dispositivo	N/A
MAC	Dirección MAC del puerto Ethernet	N/A
Timestamp	Registro de tiempo en que la lectura fue recibida	dd/mm/yyyy

Fuente: (Cambium Networks, 2016).

Con la finalidad de calcular la pérdida por recorrido entre transmisor y receptor es necesario aplicar la siguiente formula de señal recibida, que está dada por la ecuación 3.1:

$$RSSI_{Receptor} = P_t + G_{at} - P_{rec} + G_{ar} \quad (3.1)$$

Donde:

- P_t = Potencia con que la señal es emitida.
- G_{at} = Ganancia de la antena del transmisor.
- P_{rec} = Perdida por recorrido Transmisor-Receptor.
- G_{ar} = Ganancia del equipo receptor.

El reporte extraído de cnMaestro que se especifica en la Tabla 3.4 nos permite obtener solo los valores para $RSSI_{Receptor}$ por lo cual será necesario utilizar el reporte “Devices” para extraer la información correspondiente a P_t , G_{at} y G_{ar} además de otros parámetros de interés como distancia entre cada receptor con su respectivo transmisor y coordenadas GPS tal como se observa en la Figura 3.8.

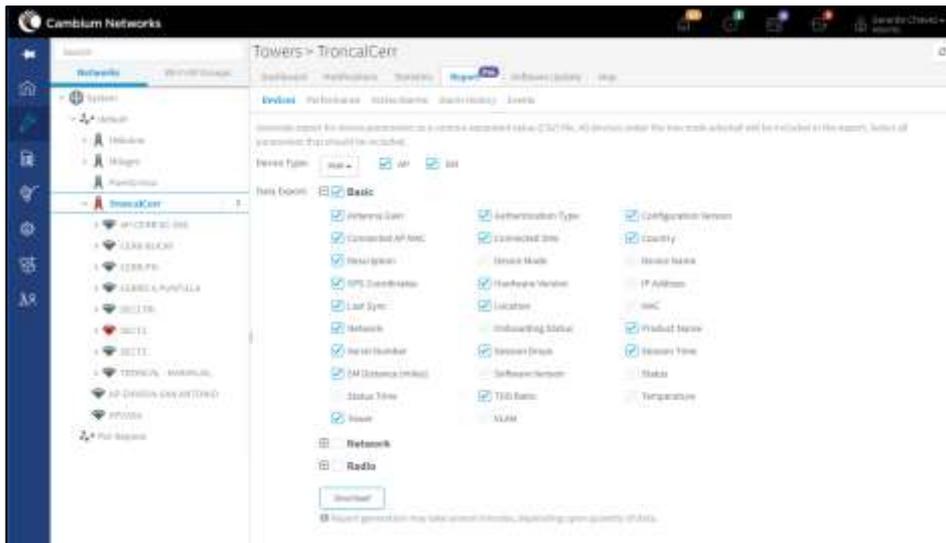


Figura 3.8: Dashboard de reporte “Devices” cnMaestro.
Fuente: (Cambium Networks, 2016).

3.5 Resultados de la recolección de mediciones.

El proceso de recolección de mediciones para los niveles de señal recibida en los equipos receptores se inició el lunes 19 de noviembre del 2018 y se finalizó el 18 de julio del 2019, durante este periodo de tiempo se han incrementado la cantidad de equipos receptores llegando contar con 36 sitios lo cual ha resultado favorable ya que estos equipos receptores han sido instalados a distancias variables con lo cual se obtiene información útil para elaboración del modelo de propagación.

La recolección de mediciones de niveles de señal se realizó en 2 modalidades que se describen a continuación:

- **Por evento – Presencia de lluvia:** se configuro la estación meteorológica para emitir correos de alerta cuando se detectara presencia de lluvia sobre la torre del equipo transmisor con lo cual se procedió a extraer desde la plataforma cnMaestro las estadísticas de los niveles de señal con una resolución de 5 minutos, es decir que en cada ocasión que se realice una recolección por evento se obtendrán 288 mediciones por cada equipo receptor, durante el periodo de recolección de mediciones se efectuaron un total de 20 recolecciones de información por evento.
- **Periódica:** en esta modalidad se procedió a exportar los registros de los niveles de señal recibida de manera periódica con una

separación de entre 7 y 10 días aproximadamente, con una resolución de 60 minutos, es decir que se en esta modalidad se obtendrán 168 mediciones por cada equipo receptor, cabe indicar que durante el periodo de recolección de mediciones se efectuaron un total de 27 recolecciones de información de este tipo.

Luego de depurar las lecturas en blanco originada por apagado de equipos o fallas de comunicación con la plataforma cnMaestro, se obtuvo un total de 310552 lecturas de niveles de señal recibida.

La información referente a presencia y niveles de lluvia fue levantada de forma paralela a cada medición realizada ya sea por evento o de manera periódica y con la misma resolución de 5 minutos y 60 minutos es decir que se obtendrá 288 lecturas del nivel de lluvia por cada recolección por evento y 168 lecturas en la modalidad periódica, con esto se lograra identificar los periodos de presencia de lluvias fuertes y correlacionar la información de los niveles de señal recibida para determinar si existen variaciones en los niveles de perdida por recorrido en estas dos situaciones.

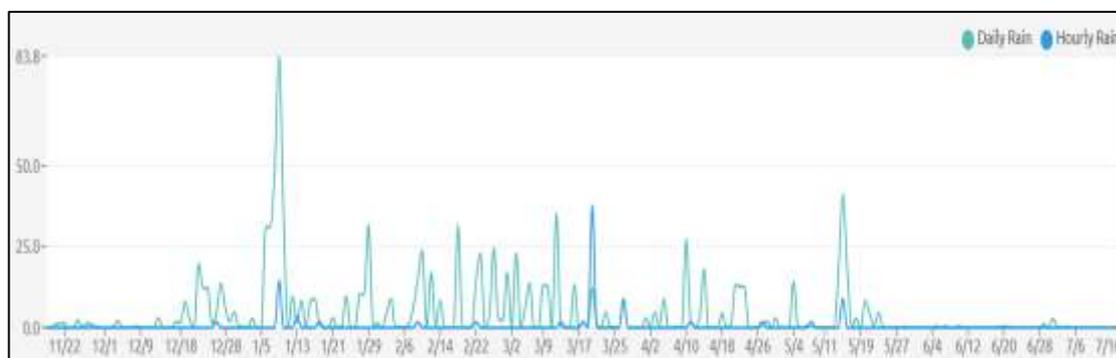


Figura 3.9. Niveles de lluvia registrados del 19 noviembre al 17 de julio 2019.

Fuente: (*AmbientWeather, 2019*).

CAPÍTULO 4: Desarrollo de modelo de propagación empírico.

Basado en los resultados obtenidos del capítulo 3, en esta sección se procede con la ejecución de técnicas estadísticas que permitan convertir los datos recopilados en un modelo de propagación empírico mediante un desarrollo dividido en tres etapas. En la primera se seleccionarán los periodos de tiempo en los que no se registró presencia de lluvia para elaborar un modelo matemático sin considerar variables ambientales, una segunda etapa en la que si se considerará la presencia de lluvia y por último se realizará una comparativa entre los resultados de la primera y segunda etapa con varios de los modelos de propagación más comúnmente utilizados para evaluar el desempeño de los modelos de propagación obtenidos.

4.1 Técnicas estadísticas y software empleado.

En estadística existen dos tipos principales de relación entre variables, la matemática que se presenta cuando existe una correlación exacta mediante el uso de fórmulas como es el caso de la velocidad, distancia y tiempo. Y la estadística mediante la cual se logra predecir el comportamiento de una variable dependiente en función de sus variables independientes.

Para determinar esta correlación entre variables existen varios métodos estadísticos que permiten establecer una estructura funcional, estas herramientas se conocen como análisis de correlación y regresión lineal/no lineal (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012).

La regresión no lineal es un método utilizado para determinar la correlación entre una variable dependiente y un conjunto de variables independientes que a diferencia de la regresión lineal, no está limitada a casos de modelos lineales, debido a que para el desarrollo del presente trabajo se cuenta con más de una variable independiente es necesario considerar el uso de la técnica estadística conocida como regresión múltiple no lineal considerando las siguientes variables independientes:

- D = Distancia entre transmisor y receptor (Km).
- W = Nivel de lluvia por periodo de tiempo (mm de agua).

Debido a que se requiere procesar una gran cantidad de información es necesario el uso de una herramienta que nos permita simplificar dicho procesamiento, para esto se utilizará el software TIBCO Statistica™ el cual es una completa plataforma de análisis avanzado que permitirá automatizar tareas rutinarias y análisis de gran escala en donde se podrá preparar, modelar, visualizar, operacionalizar y monitorear análisis de manera simple (TIBCO, 2019).

4.2 Desarrollo de modelo de propagación.

Debido a que se considerara el efecto de variables ambientales para el presente trabajo se han identificado los periodos de tiempo en los que se han registrado niveles de precipitación de lluvia a partir de los 15mm/h y se ha agrupado las mediciones tal como se indica en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Grupos de mediciones por precipitación de lluvia.

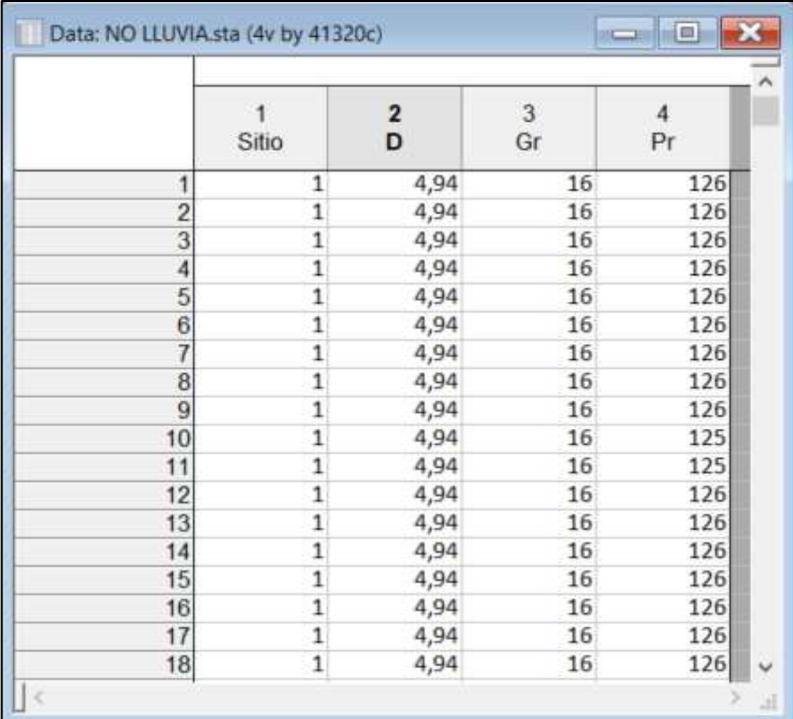
Nivel de Lluvia	Rango de Fechas	Numero de mediciones
TODAS	19 de Noviembre 2018 al 18 de Julio 2019	310552
No Lluvia	Diciembre 5-7, 9-10, 15-16 Enero 1-2, 4-5 Febrero 15-17, 19-22 Marzo 7-8, 19-20, 24 Abril 7-8, 16, 23-25 Mayo 7, 13, Junio 11-16, 19-30 Julio 1-18 Diciembre 23, 26 Enero 29, 30 Febrero 8, 18, 23	41320
15 - 20mm/h	Marzo 12, 17, 31 Abril 10, 22 Mayo 21 Enero 7	19403
20-30mm/h	Marzo 12, 14 Mayo 15, 31	18997
30-40mm/h	Enero 7 Marzo 3, 21, 22	22126
40-55mm/h	Febrero 13, 26	3970
70-90mm/h	Enero 7, 9	4812

Fuente: (AmbientWeather, 2019)

Una vez agrupada la información se efectuará el análisis correspondiente con la ayuda del software TIBCO Statistica como se describe en las siguientes secciones.

4.2.1 Modelo de propagación sin considerar variables ambientales.

Tomando como base de datos las mediciones obtenidas durante periodos en los que no se registró lluvia se procedió a ingresar la información en el software TIBCO tomando variables de interés a los campos Sitio, Distancia, Ganancia de Antena Receptora y Pérdida por recorrido calculada tal como se muestra en la Figura 4.1.



	1 Sitio	2 D	3 Gr	4 Pr
1	1	4,94	16	126
2	1	4,94	16	126
3	1	4,94	16	126
4	1	4,94	16	126
5	1	4,94	16	126
6	1	4,94	16	126
7	1	4,94	16	126
8	1	4,94	16	126
9	1	4,94	16	126
10	1	4,94	16	125
11	1	4,94	16	125
12	1	4,94	16	126
13	1	4,94	16	126
14	1	4,94	16	126
15	1	4,94	16	126
16	1	4,94	16	126
17	1	4,94	16	126
18	1	4,94	16	126

Figura 4.1. Variables para consideradas para análisis en Software TIBCO Statistica.
Fuente: Elaborado por el autor (TIBCO, 2019)

Para el desarrollo del modelo de propagación se parte de la premisa de que la ecuación de pérdida por recorrido debe ser mayor a la pérdida en espacio libre cuya ecuación viene dada por la ecuación 4.1:

$$P_{Free} = 32,4 + 20\text{Log}(f) + 20\text{Log}(D) \quad (4.1)$$

Donde:

- P_{Free} = Perdida en espacio libre.
- f = Frecuencia de trabajo en MHz (5800MHz).
- D = Distancia en Km.

Debido a que el presente trabajo solo considera la frecuencia de 5800MHz se puede concluir que el modelo de propagación presentara la estructura de la ecuación 4.2:

$$P_{No\ Lluvia} = A + B * Log(D) \quad (4.2)$$

Dónde:

- $P_{No\ Lluvia}$ = Perdida sin presencia de lluvia.
- A = Componente aditiva de modelo de propagación.
- B = Componente multiplicativa de modelo de propagación.
- D = Distancia en Km.

Utilizando la herramienta de estimación no lineal del software TIBCO Statistica se procede a buscar una aproximación mediante la “regresión lineal especificada por usuario” de las mediciones obtenidas con la estructura de la ecuación 4.2, considerando la función de control para ajuste Loss que se detalla en la ecuación 4.3:

$$Loss = (OBS - PRED)^2 \quad (4.3)$$

Dónde:

- OBS = Valor medido en el punto x.
- $PRED$ = Valor Calculado con función resultante.

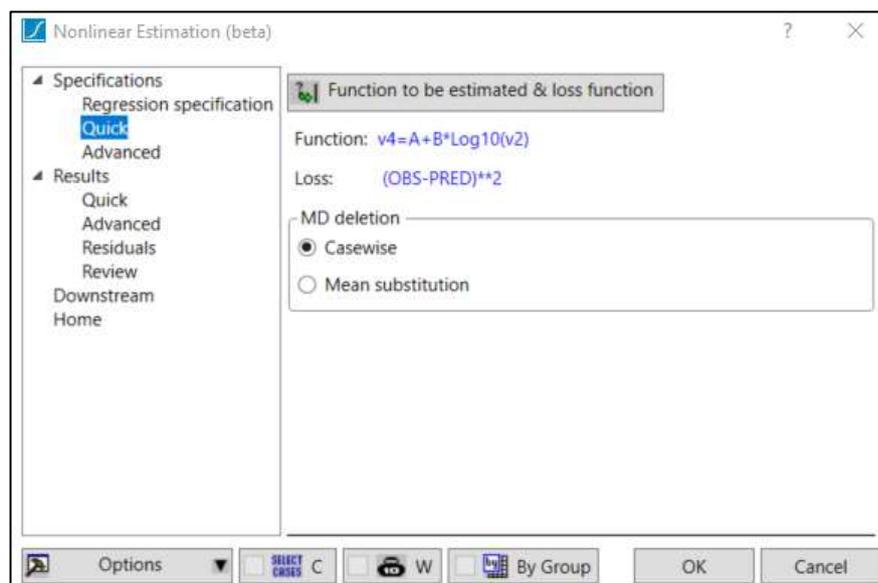


Figura 4.2. Configuración de Herramienta “Nonlinear Estimation”.
Fuente: Elaborado por el autor (TIBCO, 2019)

Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la Figura 4.3 con valores de 118,228 y 18,3967 para las componentes aditivas y multiplicativas respectivamente con una varianza explicada del 85,184%.

		Model: $v4=A+B*\text{Log}_{10}(v2)$ (NO LLUVIA)	
		Dep. var: Pr Loss: (OBS-PRED)**2	
		Final loss: 511657,68682 R= ,92295 Variance explained: 85,184%	
N=41320	A	B	
Estimate	118,228	18,3967	

Figura 4.3. Resultados de Herramienta “Nonlinear Estimation”.
Fuente: Elaborado por el autor (TIBCO, 2019)

Adicionalmente se procede a generar una gráfica explicativa del modelo de propagación obtenido en conjunto con las mediciones reales, tomando como eje X a la Distancia y a la perdida por recorrido como eje Y, para esto se usa la herramienta “Scatterplot” con la cual se realiza una aproximación de tipo logarítmica sobre un grafica con acumulación por frecuencia donde se puede observar fácilmente donde se acumula el mayor número de las mediciones para cada sitio.

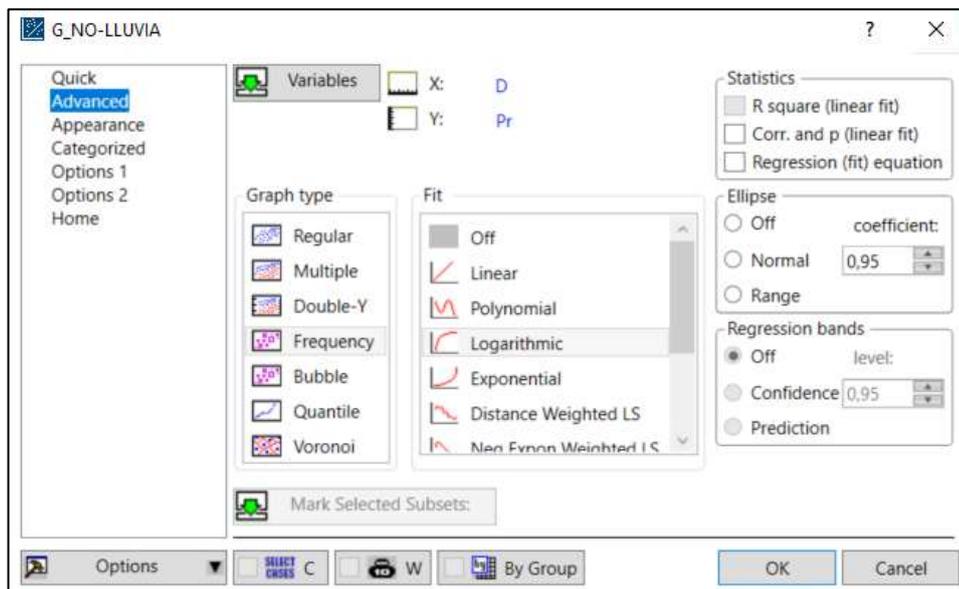


Figura 4.4. Configuración de Herramienta Scatterplot en Software TIBCO Statistica.
Fuente: Elaborado por el autor (TIBCO, 2019)

Se puede observar que los valores de pérdida por recorrido se ajustan a una gráfica de tipo logarítmica que se incrementa en función de la distancia entre la antena emisora y receptora tal como se puede observar en la Figura 4.5.

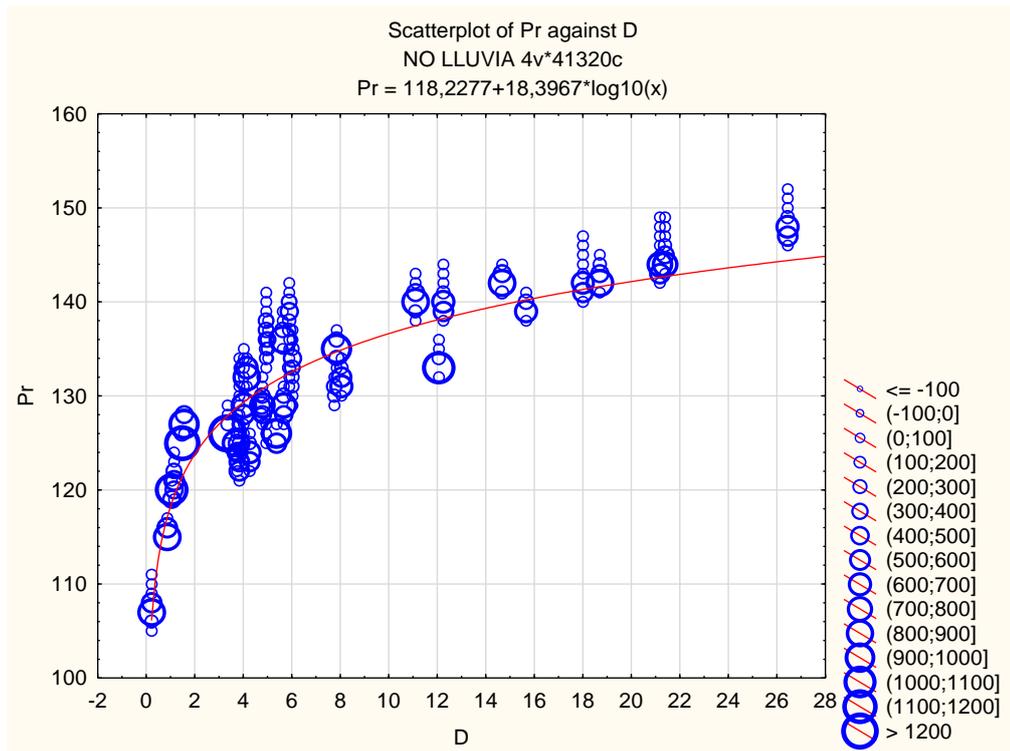


Figura 4.5. Comparativa de mediciones observadas y modelo de propagación calculado.
Fuente: Elaborado por el autor (TIBCO, 2019)

Como resultado de esta primera etapa se pudo observar una alta correlación entre la variable Distancia y la Pérdida por recorrido con una varianza explicada superior al 85%, además de lograr determinar los componentes aditivos y multiplicativos del modelo de propagación para el caso de no presencia de lluvia en la cuenca baja del río Guayas obtenido, que se define mediante la ecuación 4.4.

$$P_{No\ Lluvia} = A + B * \text{Log}(D) \therefore \begin{cases} A = 118,2277 \\ B = 18,3967 \end{cases} \quad (4.4)$$

Donde:

- $P_{No\ Lluvia(dB)}$ = Pérdida por recorrido sin presencia de lluvia.
- $A_{(dB)}$ = Componente aditiva de modelo de propagación.
- $B_{(dB)}$ = Componente multiplicativa de modelo de propagación.
- D_{Km} = Distancia entre antena Emisora y Receptora.

4.2.2 Modelo de propagación considerando variables ambientales.

La Cuenca baja del río Guayas es una zona geográfica con un alto índice de presencia de lluvia durante la temporada de invierno por lo cual el presente estudio considera la incidencia que esta variable ambiental pudiera tener sobre los niveles de pérdida por recorrido, para esto se ha realizado la recolección de mediciones tal como se puede observar en la Tabla 4.1.

Para reconocer si existe una variación apreciable se procede a efectuar el mismo procedimiento empleado para el modelo de propagación sin considerar variables ambientales con lo cual se obtienen los resultados observados en la Figura 4.6.

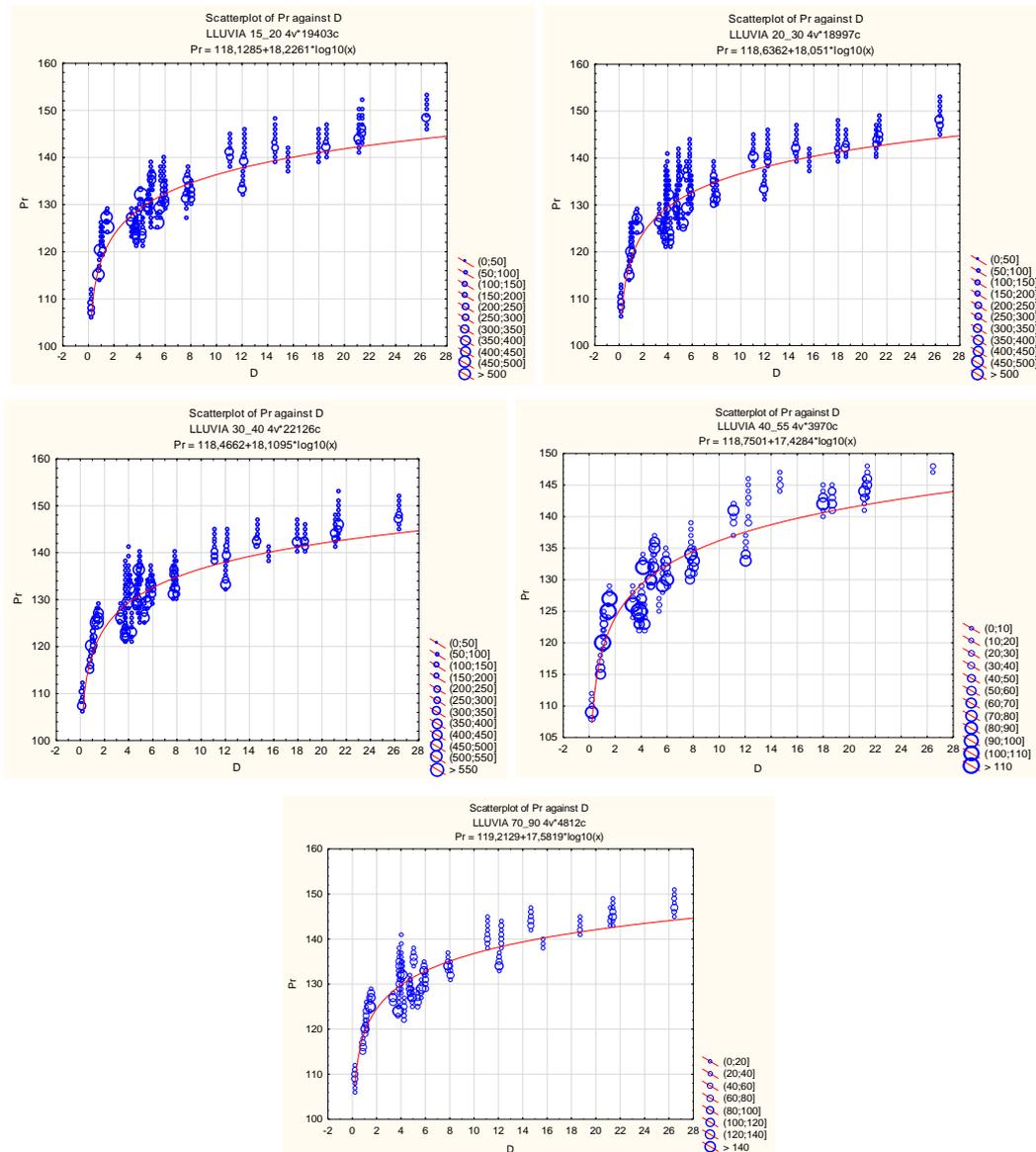


Figura 4.6. Modelo de propagación observado y calculado considerando presencia de lluvia.

Fuente: Elaborado por el autor (TIBCO, 2019)

Se puede observar que las ecuaciones calculadas para los modelos matemáticos en los diferentes escenarios con presencia de lluvia no presentan una variación significativa, tal como se muestra en la Figura 4.7 la variación es de menos de 1dB.

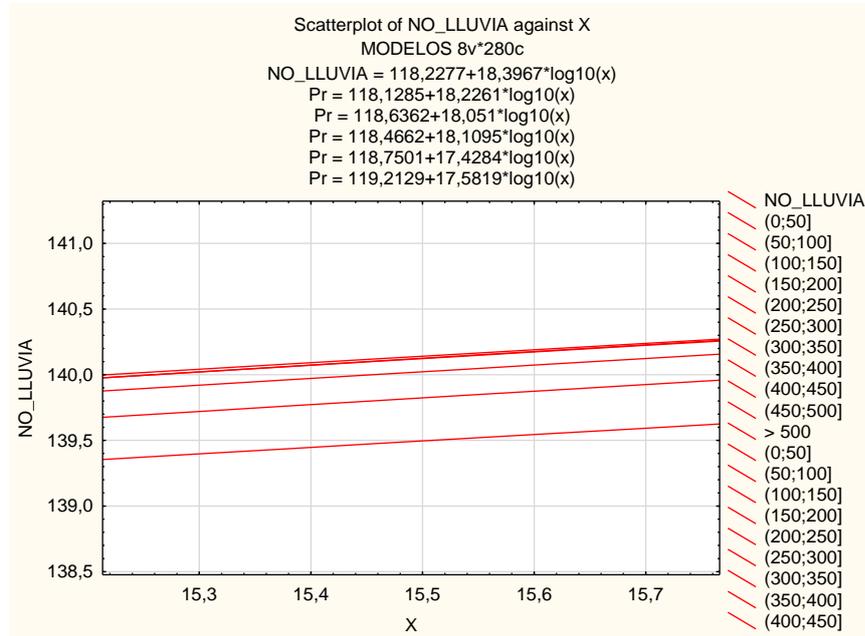


Figura 4.7. Modelo de propagación observado y calculado considerando presencia de lluvia.

Fuente: Elaborado por el autor (TIBCO STATISTICA, 2013)

Esto es coherente con las recomendaciones UIT-R P.838.3 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), el cual es un modelo de atenuación específica originado por presencia de lluvia para la elaboración de métodos de predicción y modelos de propagación, estas recomendaciones indican que las atenuaciones causadas por lluvia pueden despreciarse para frecuencias por debajo de los 5GHz y su comportamiento está dado por la ecuación 4.5 que se describe a continuación (UIT, 2005):

$$\gamma = kR^\alpha \quad (4.5)$$

Dónde:

- γ = Atenuación específica (dB/Km).
- R = Intensidad de lluvia (mm/h).
- K, α = Coeficientes de polarización vertical y horizontal que dependen de la frecuencia de trabajo.

En la Figura 4.8 se pueden observar las curvas de atenuación específica en función de la frecuencia para distintos valores de presencia de lluvia con lo cual es posible concluir que la precipitación de lluvia no tiene un efecto significativo en el presente trabajo de investigación ya que se utiliza una frecuencia de trabajo de 5.8GHz.

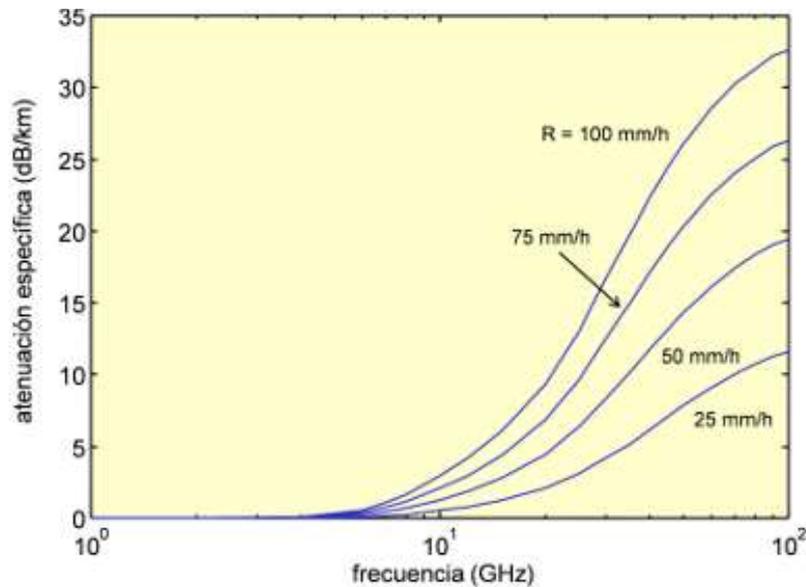


Figura 4.8. Curvas de atenuación específica basado en UIT-R P.838-3.
Fuente: (Ramos, s.f.).

De este análisis se obtienen los resultados especificados en la Tabla 4.2 donde se puede observar que los modelos de propagación calculados para los diferentes escenarios con presencia de lluvia tienen una alta similitud entre sus componentes aditiva y multiplicativa por lo cual se puede concluir que la presencia de lluvia no ocasiona variaciones que ameriten ser consideradas dentro del modelo de propagación calculado en el presente estudio.

Tabla 4.2: Modelos de propagación calculados con presencia de lluvia.

Nivel de Lluvia	Modelo de Propagación obtenido
No Lluvia	$P_{No\ Lluvia} = 118,22 + 18,39 * Log(D)$
15 - 20mm/h	$P_{15-20} = 118,12 + 18,22 * Log(D)$
20-30mm/h	$P_{20-30} = 118,63 + 18,05 * Log(D)$
30-40mm/h	$P_{30-40} = 118,46 + 18,10 * Log(D)$
40-55mm/h	$P_{40-55} = 118,75 + 18,42 * Log(D)$
70-90mm/h	$P_{70-90} = 118,21 + 18,58 * Log(D)$

Fuente: Elaborado por el Autor.

Debido a esto se procederá a utilizar el modelo de propagación calculado mediante la ecuación 4.4 para la siguiente sección del presente estudio en donde se realizará una comparativa del modelo de propagación obtenido con otros modelos ampliamente utilizados.

4.3 Análisis comparativo de modelo de propagación resultante.

En esta sección se procederá a validar la efectividad del modelo de propagación empírico generado, para esto se realizará un análisis comparativo con modelos de propagación ampliamente utilizados, seleccionando sus parámetros de configuración para ambientes con condiciones comparables a la Cuenca Baja del Río Guayas, Para esta comparativa se ha tomado el mismo rango de distancias entre antena emisora y receptora para generar los valores teóricos de cada modelo de propagación y proceder a graficar la distribución y agrupación de sus resultados como se puede observar en la Figura 4.9, la misma que presenta en su eje Y los valores en dB de la pérdida observada mediante mediciones y las teóricas calculadas para cada modelo de propagación.

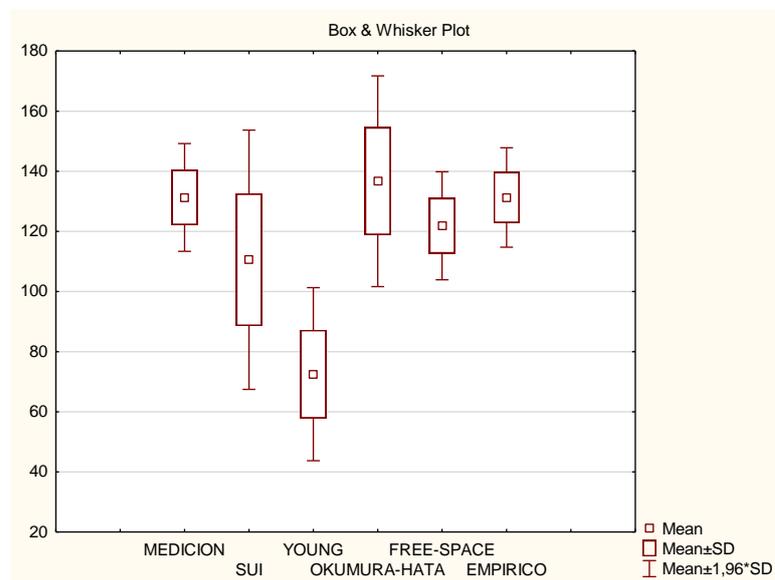


Figura 4.9. Comparativa de distribución de resultados teóricos mediante Diagrama de cajas.

Fuente: Elaborado por el autor (TIBCO, 2019)

De la Figura 4.9 se puede observar que el modelo de propagación empírico generado en el presente trabajo es el que presenta una mayor similitud entre sus valores teóricos y los observados en comparación con los demás modelos de propagación considerados dentro de la comparativa, se puede observar también que la distribución de sus resultados es más consistente y menos dispersa que otros modelos de propagación como es el caso del modelo de propagación SUI, la dispersión de estos valores teóricos se puede observar también a partir de su desviación estándar, valores mínimos y máximos que se especifican en la Tabla 4.3 donde se observan los resultados de un análisis básico de estadística descriptiva aplicado a las tablas de valores teóricos calculados para cada modelo de propagación.

Tabla 4.3: Análisis básico de estadística descriptiva para modelos de propagación analizados.

Variable	Descriptive Statistics (COMPARACION)				
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
MEDICION	41320	131,3051	105,0000	152,0000	9,14228
SUI	41320	110,5875	44,9713	144,7075	21,99291
YOUNG	41320	72,5201	24,0927	91,2928	14,68088
OKUMURA-HATA	41320	136,7225	83,3745	164,4630	17,88088
FREE-SPACE	41320	121,8856	94,5170	136,1171	9,17327
EMPIRICO	41320	131,3050	106,1304	144,3956	8,43789

Fuente: Elaborado por el autor (TIBCO, 2019)

Con la finalidad de realizar una comparativa simplificada se ha elaborado, mediante la herramienta de software TIBCO Statistica, la Figura 4.10 en la cual se observan los valores teóricos y experimentales obtenidos, de tal manera que se pueda apreciar no solo la distribución de sus resultados, sino también el comportamiento de la curva de pérdida por recorrido resultante de cada modelo de propagación evaluado.

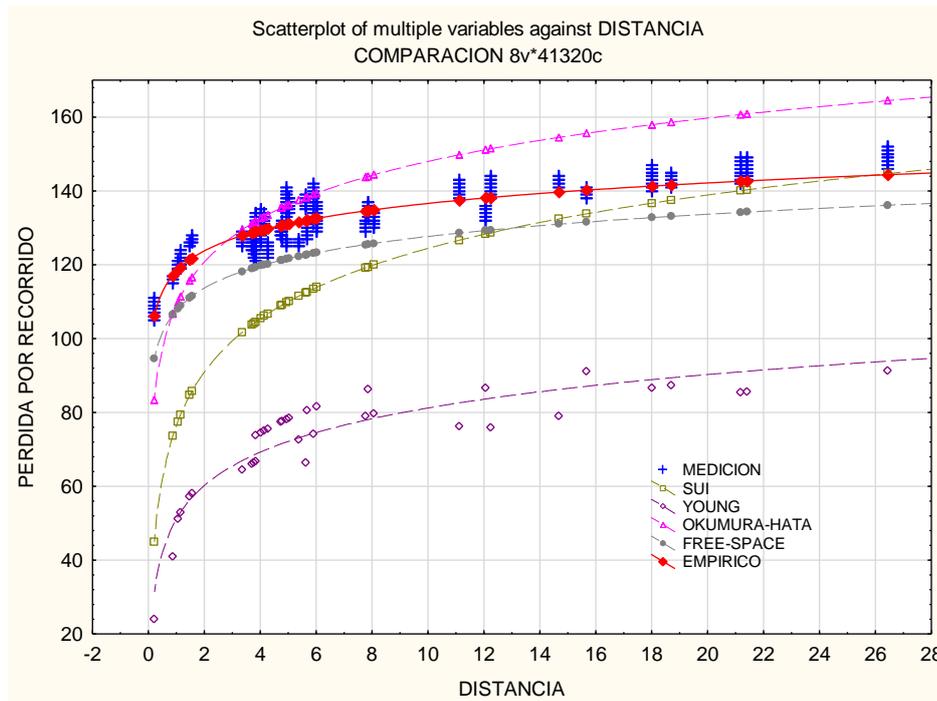


Figura 4.10. Comparativa grafica de modelos de propagación.
Fuente: Elaborado por el autor (TIBCO, 2019)

De la Figura 4.10 se observa que el modelo de propagación empírico es el que presenta mayor similitud con los valores experimentales, seguido por el modelo de propagación de pérdida en espacio libre que también presenta una alta similitud en la forma de su curva pero con valores inferiores como es de esperarse ya que este modelo no considera las pérdidas adicionales generadas por las condiciones del terreno.

Para contar con un indicador del desempeño del modelo de propagación empírico obtenido y evaluar su efectividad respecto a otros modelos, se recurre al análisis de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE), este análisis permitirá obtener un índice de error entre los valores teóricos y los experimentales y viene dado por la ecuación 4.6.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_e - X_t)^2}{n}} \quad (4.6)$$

Dónde:

- X_e = Valores experimentales obtenidos (dB).
- X_t = Valores teóricos calculados (dB).
- n = Número total de mediciones.

De este análisis se obtiene la Tabla 4.4 donde se observa un resultado coherente con el análisis de gráficos anteriores ya que el índice RMSE, para el modelo de propagación empírico, es el menor de todos los modelos analizados.

Tabla 4.4: Modelos de propagación calculados con presencia de lluvia.

MODELO DE PROPAGACIÓN	RMSE (dB)
SUI	25,01
YOUNG	59,42
OKUMURA-HATA	11,44
FREE-SPACE	10,08
EMPIRICO	3,52

Fuente: Elaborado por el Autor.

Con el resultado observado se puede interpretar que el modelo de propagación obtenido es más confiable para ambientes con condiciones geográficas como el de la “Cuenca Baja del Rio Guayas” con un error esperado inferior a los 3,6 dB mientras que otros modelos presentan errores esperados de hasta 25 y 59 dB esto debido principalmente a que no fueron diseñados para entornos rurales similares a los considerados en el presente estudio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.

- 1) La estación meteorológica instalada en el Cerro Huaquillas de la Troncal ha facilitado la recolección de información referente a las condiciones ambientales con un buen nivel de confiabilidad, lo cual ha permitido identificar los periodos con presencia de lluvia en el sector.
- 2) La información referente a niveles de señal y condiciones ambientales recopilada en conjunto ha permitido realizar un análisis del efecto de la presencia de lluvia sobre los enlaces inalámbricos Punto a Multipunto en la frecuencia de 5,8GHz para la Cuenca Baja del Rio Guayas, con esto se puede concluir que su efecto es despreciable lo cual es coherente con las recomendaciones UIT-R P.838.3 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) (UIT, 2005)
- 3) Los datos experimentales recolectados han permitido elaborar mediante la ayuda del software de un modelo de propagación empírico con un nivel de confiabilidad del 85,18% respecto a las mediciones reales lo cual se considera un modelo matemático aceptable que describe de manera correcta el comportamiento de la curva de pérdida por recorrido para la frecuencia de 5,8GHz en la Cuenca Baja del Rio Guayas.
- 4) En base a los análisis de comparativa gráfica y estadística realizados, se puede concluir que el modelo de propagación empírico elaborado es un modelo con un mayor grado de efectividad que otros modelos de propagación ampliamente usados para la frecuencia de 5,8GHz en ambientes geográficos similares a los de la Cuenca Baja del Rio Guayas.
- 5) Se puede concluir que el modelo de propagación que mayor similitud presenta, en su forma de onda y niveles de señal, es la de pérdida en espacio libre denotándose una vez más la importancia de este modelo de propagación en los cálculos teóricos de perdida por recorrido.

- 6) Se puede concluir que para enlaces Punto a Multipunto a distancias entre 1 y 28 Kilómetros, con frecuencia de trabajo de 5,8GHz para zonas geográficas similares a la Cuenca Baja del Rio Guayas el siguiente modelo de propagación es válido con una confiabilidad del 85%:

$$P = A + B * \text{Log}(D) \therefore \begin{cases} A = 118,2277 \\ B = 18,3967 \end{cases}$$

Dónde:

- $P_{(dB)}$ = Perdida por recorrido.
- $A_{(dB)}$ = Componente aditiva de modelo de propagación.
- $B_{(dB)}$ = Componente multiplicativa de modelo de propagación.
- D_{Km} = Distancia entre antena Emisora y Receptora.

RECOMENDACIONES.

- 1) Para contar con un análisis más detallado sobre la incidencia de la presencia de lluvia en los niveles de señal de los enlaces inalámbricos se recomienda contar con una estación meteorológica profesional que permita sincronizar la hora y fecha de las mediciones experimentales de niveles de señal con los niveles de lluvia mediante Network Time Protocol (NTP).
- 2) Se recomienda incrementar el número de variables consideradas dentro del análisis del modelo de propagación empírico haciendo uso de las alturas de las antenas emisoras y receptoras con la finalidad de mejorar el nivel de confiabilidad del modelo de propagación empírico.
- 3) Continuar con mediciones de los niveles de señal en los clientes multipunto con lo cual se podría tener una trazabilidad anual del comportamiento de pérdida por recorrido, sobre todo en temporadas donde la saturación de agua en el suelo es mayor y donde el nivel freático se incrementa, esto resulta de interés principalmente para zonas de cultivo con alta presencia de vegetación como banano y piscinas de camaroneras presentes en la zona geográfica considerada en este estudio.
- 4) Se recomienda identificar los clientes inalámbricos donde la instalación de las antenas suscriptoras presenten deterioro o desperfectos en su montaje para ser excluidas en posteriores análisis, esto debido a que durante el proceso de recolección de mediciones se presentaron algunos datos aberrantes que posteriormente fueron atribuidos al movimiento o exceso de vibración en las estructuras metálicas y antenas de algunos clientes.
- 5) Someter el modelo de propagación elaborado a pruebas de campo con los ISP del sector para validar de manera práctica su efectividad en campo además de someterla a diferentes entornos geográficos para identificar las limitaciones en su usabilidad.

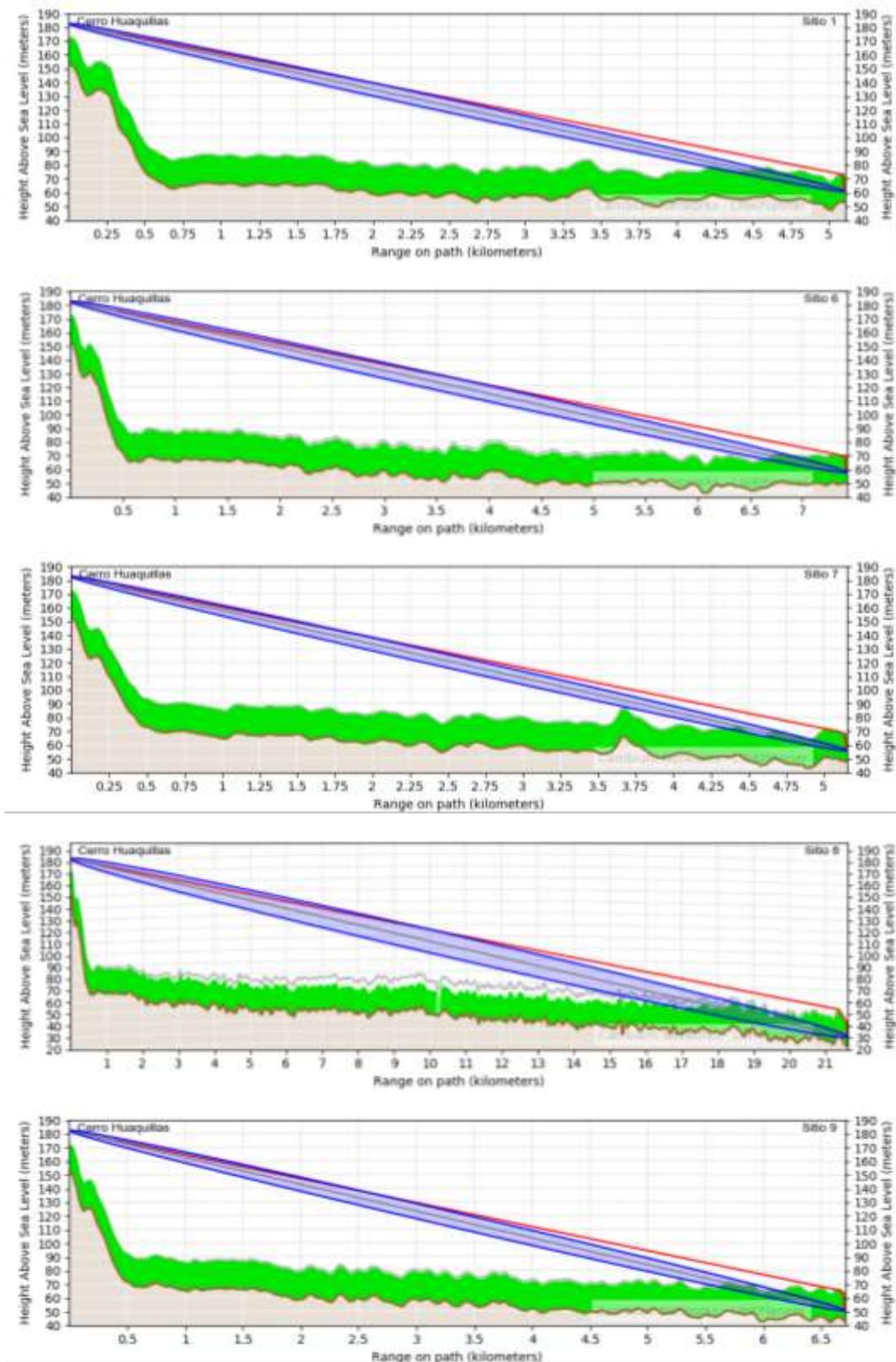
BIBLIOGRAFIA

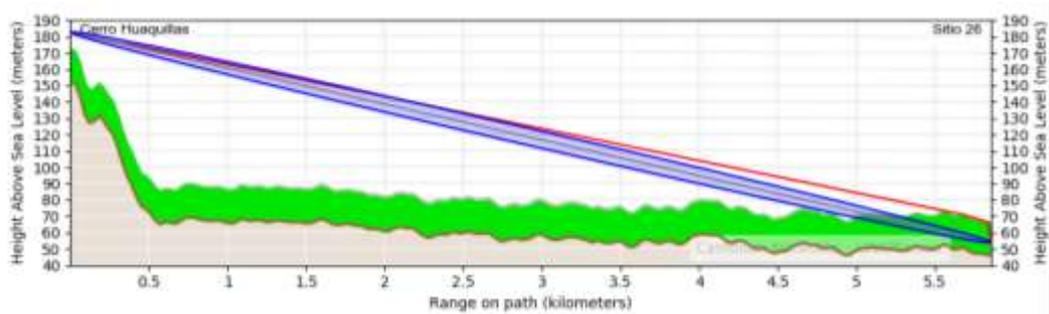
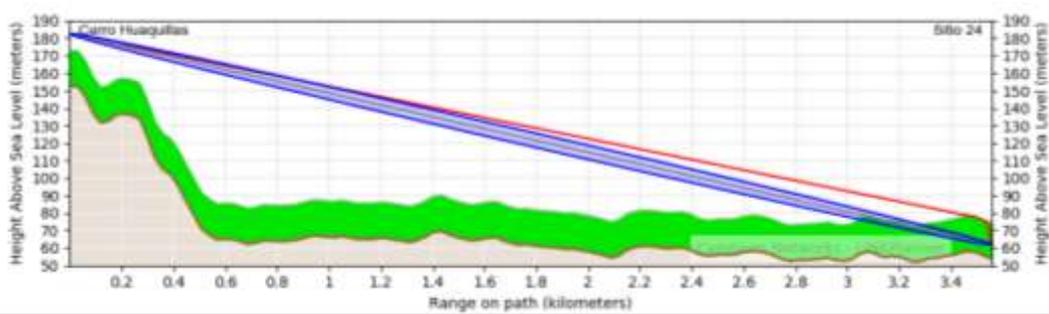
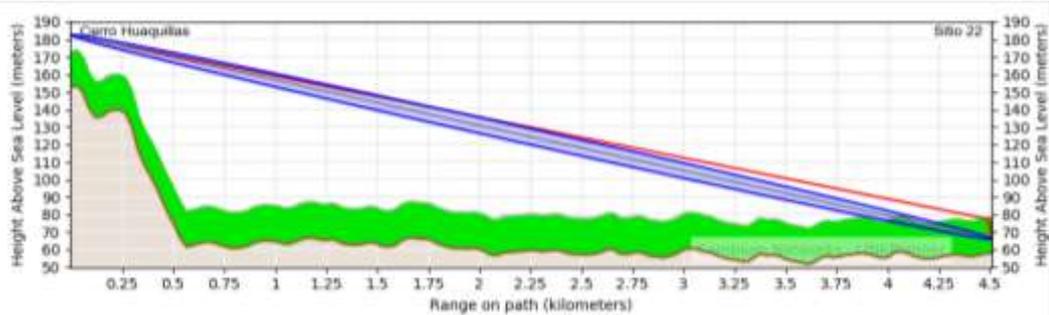
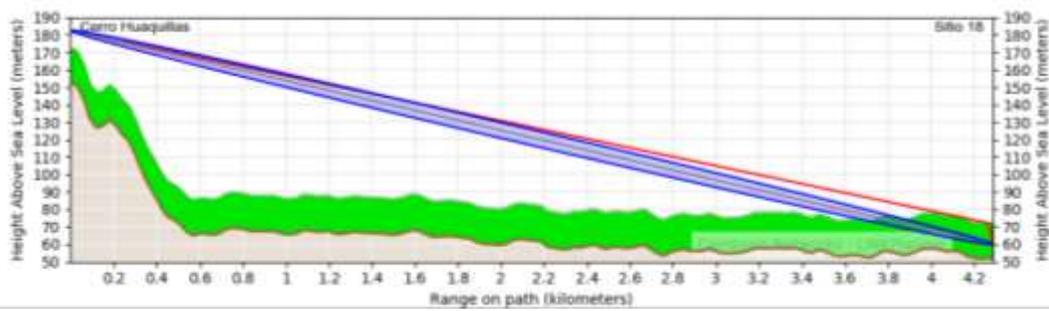
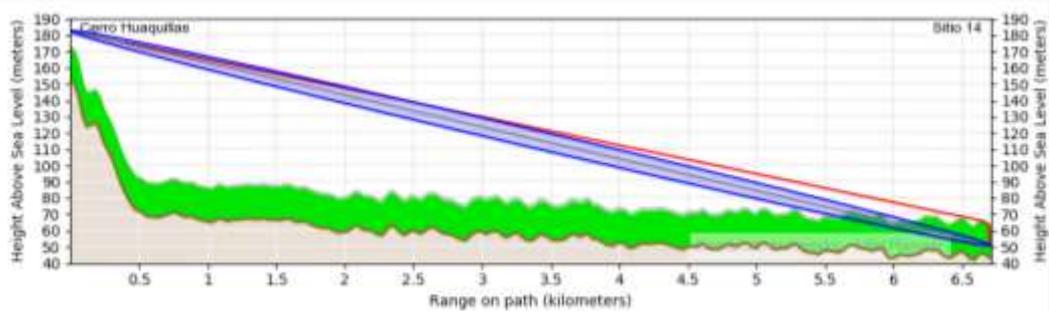
- Ambient Weather. (2019). *Ambient Weather Monitoring Weather Station*.
Obtenido de <https://www.ambientweather.com/amws1400ip.html>
- AmbientWeather. (2019). *Dashboard Ambient Weather - Cerro La Troncal*.
Obtenido de <https://dashboard.ambientweather.net/dashboard>
- Anguís, J. (2008). *Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Camargo, J. (2018). *Modelo de Cobertura para Redes Inalámbricas de Interiores*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Cambium Networks. (2016). *cnMaestro Cambium Networks*. Obtenido de <https://us-e1-s11-14s5axfvql.cloud.cambiumnetworks.com/#/0/home-view/home>
- Crespo, M. (2018). *Validación de Modelo de Propagación Empírico para conectividad Exterior en Áreas Rurales de la Cuenca Baja del Río Guayas en 5GHz*. Guayaquil: Escuela Superior Politecnica del Litoral.
- INEC. (2019). *Estadísticas Sociodemográficas y Sociales*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Censos: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). Summary for Policymakers. *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*, 1-30. doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- NETKROM GROUP. (2019). *WISP Solutions for Wireless ISP, HotSpot, Mesh, WLAN, Wireless LAN, WI-FI and WIMAX Applications*. Obtenido de http://www.netkrom.com/legado/sol_wisp.php?item=solutions
- Ojeda, V., & Vinuesa, A. (2017). *Análisis comparativo técnico económico y regulatorio de una red que provea la cobertura de servicios de telefonía en el recinto Bajada de Chanduy de la provincia del Guayas*. Escuela Superior Politecnica del Litoral.
- Pérez, N., Herrera, J., Uzcátegui, J., & Peña, J. .,–6. (2012). Modelo de propagación en las ciudades de Mérida (Venezuela) y Cúcuta

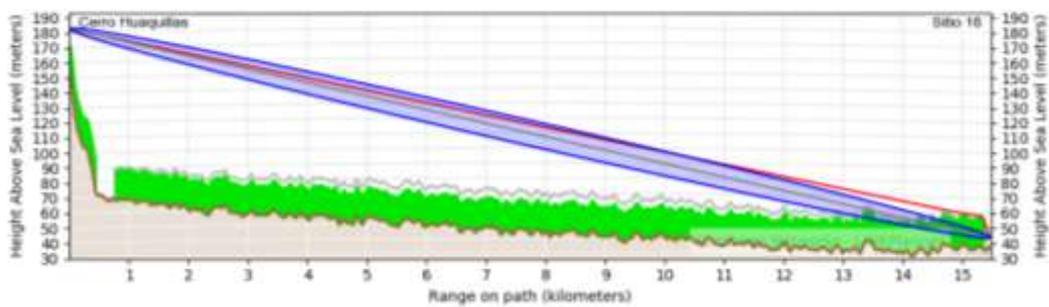
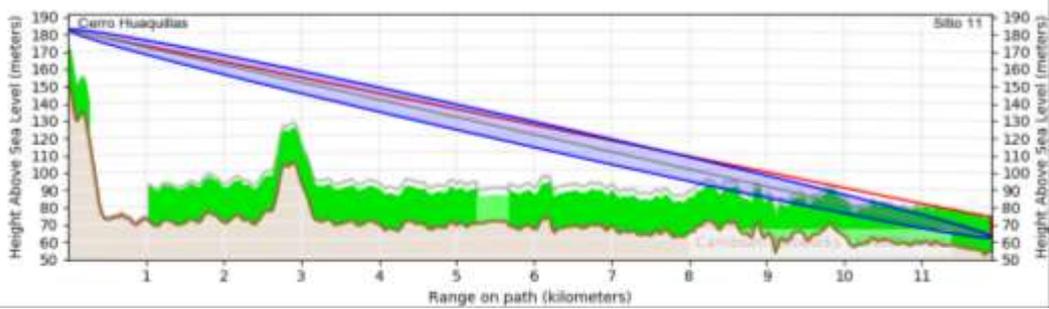
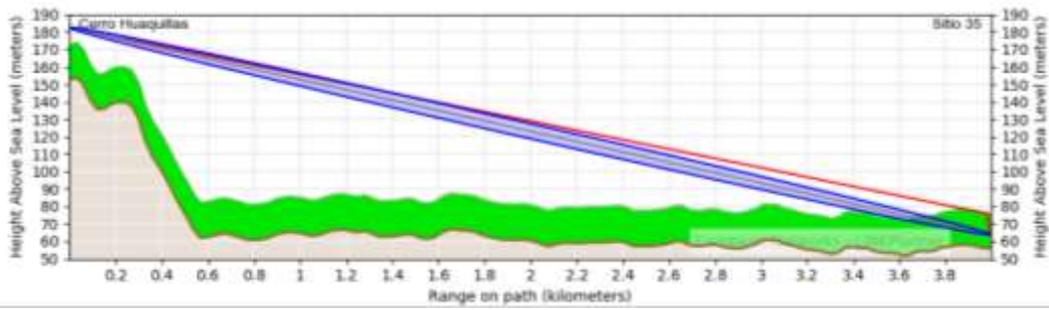
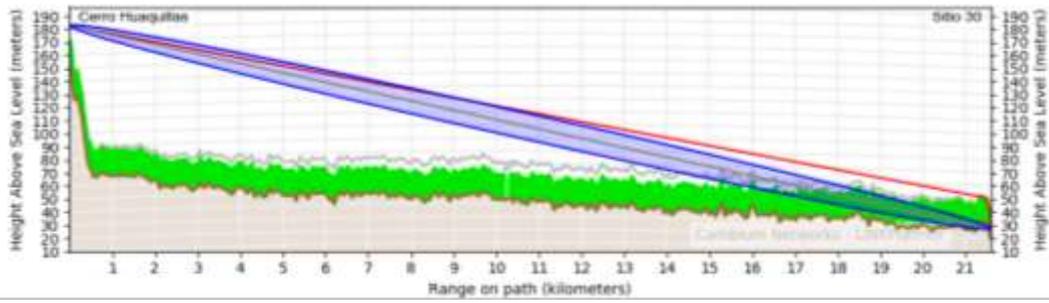
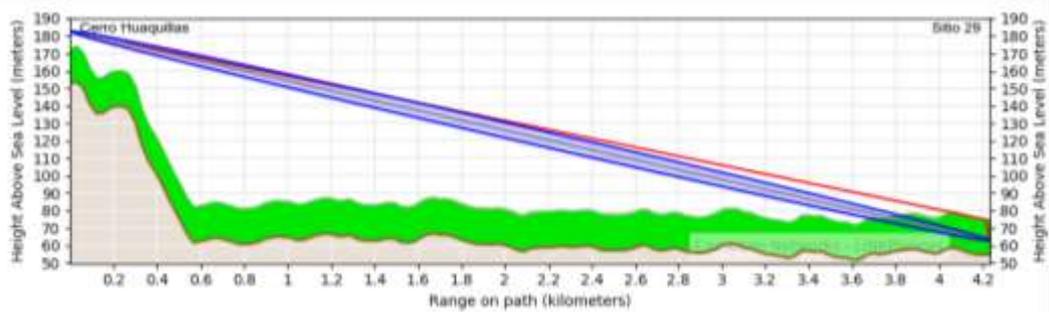
- (Colombia) para redes WLAN, operando en 2.4 GHz, en ambientes exteriores. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 16(62). Obtenido de <http://www.scielo.org.ve/pdf/uct/v16n62/art07.pdf>
- Ramos, F. (s.f.). *Cálculo de la atenuación por lluvia en un radioenlace*. Obtenido de Radioenlaces. Tecnologías Inalámbricas y diseño de radioenlaces: <http://www.radioenlaces.es/articulos/calculo-de-la-atenuacion-por-lluvia-en-un-radioenlace/>
- Redacción Actualidad. (2016). *El Guayas 'naufraga' por la sedimentación*. Obtenido de Diario El Telégrafo: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/guayaquil/1/el-guayas-naufraga-por-la-sedimentacion>
- Seybold, J. (2013). *Introduction to RF Propagation*. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience. Obtenido de <http://doi.org/10.1057/9781137312747.0003>
- TIBCO. (2019). *TIBCO Statistica™ Software*. Obtenido de <https://www.tibco.com/es/node/19696>
- Tirado, K., & Muñoz, J. (2016). Una revisión de modelos de propagación para planificación y dimensionamiento de sistemas de comunicaciones móviles. *Revista Ingeniería Al Día*, 2(2), 72–94. Obtenido de <http://revista.unisinu.edu.co/revista/index.php/ingenieriaaldia/article/view/32>
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Mexico: Prentice Hall.
- UIT. (2005). *RECOMENDACIÓN UIT-R P.838-3. Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia*. Obtenido de Unión Internacional de Telecomunicaciones: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-!!!PDF-S.pdf
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Mexico: Pearson. Obtenido de https://www.academia.edu/34666757/PROBABILIDADES_Y_ESTADISTICA_Para_ingenieria_y_ciencias_-_WALPOLE

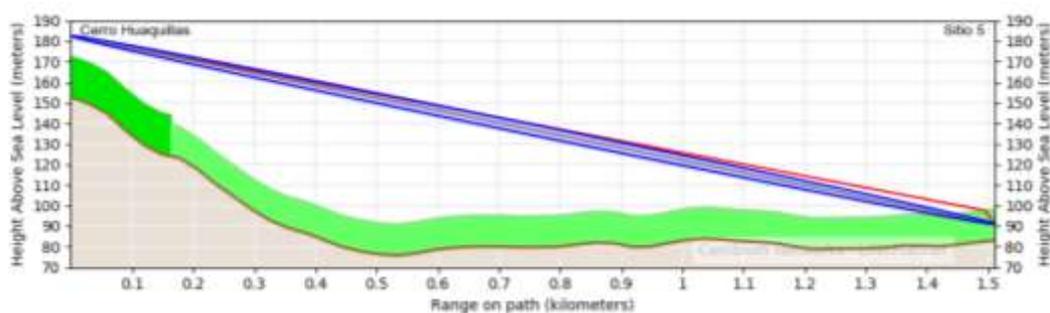
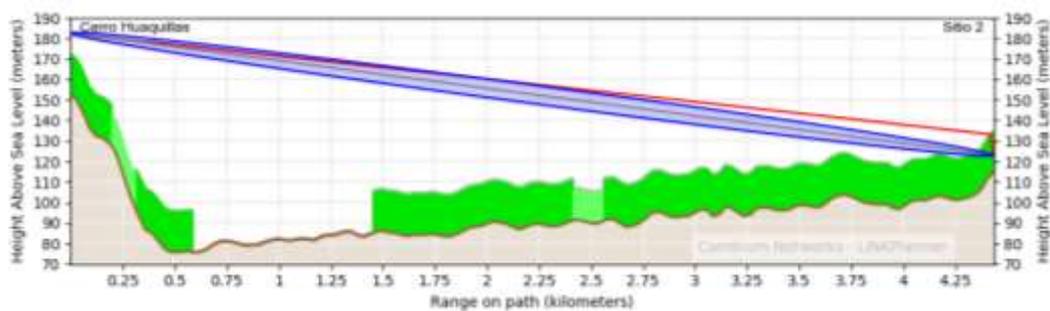
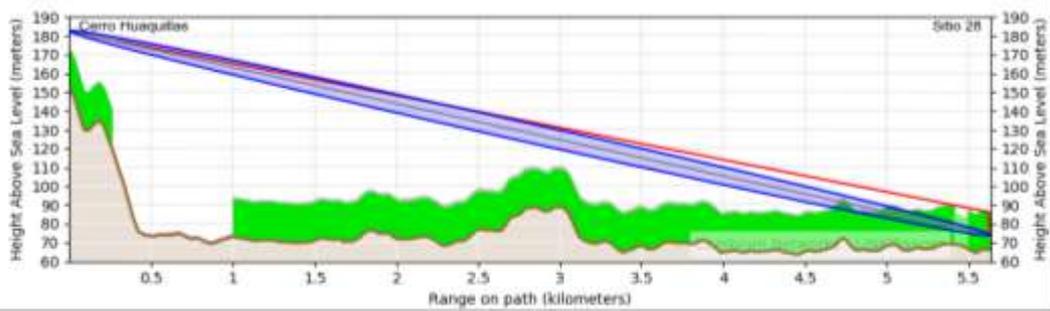
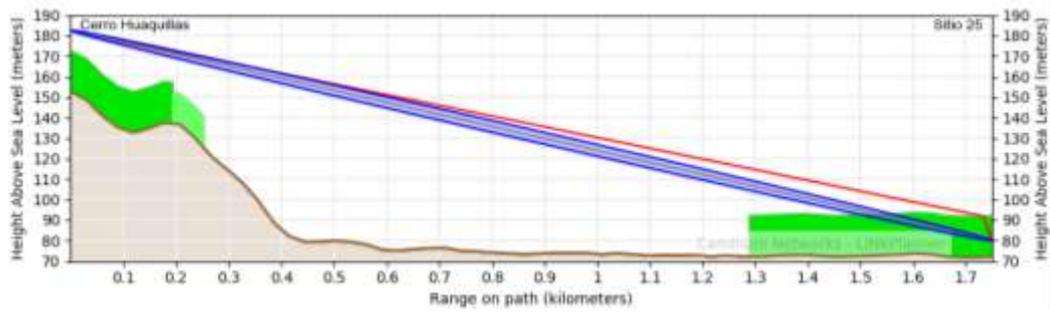
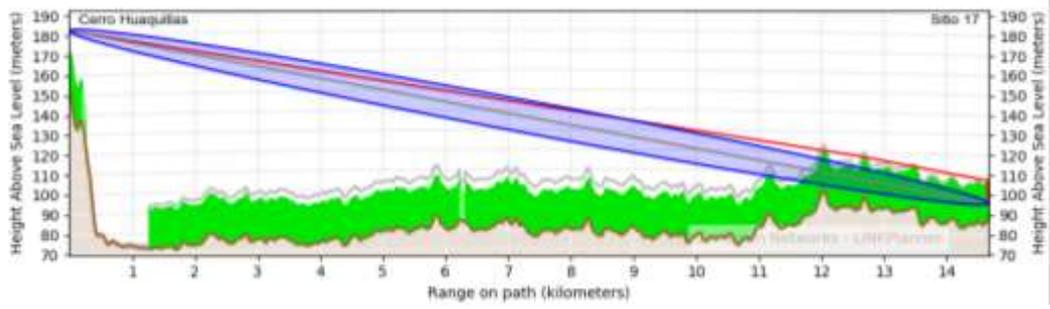
ANEXOS

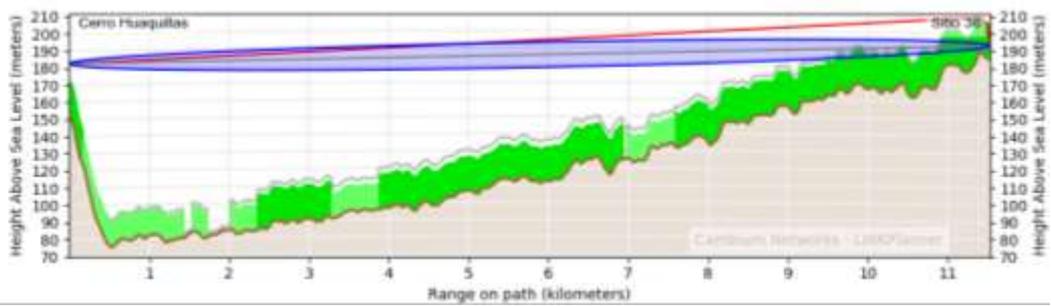
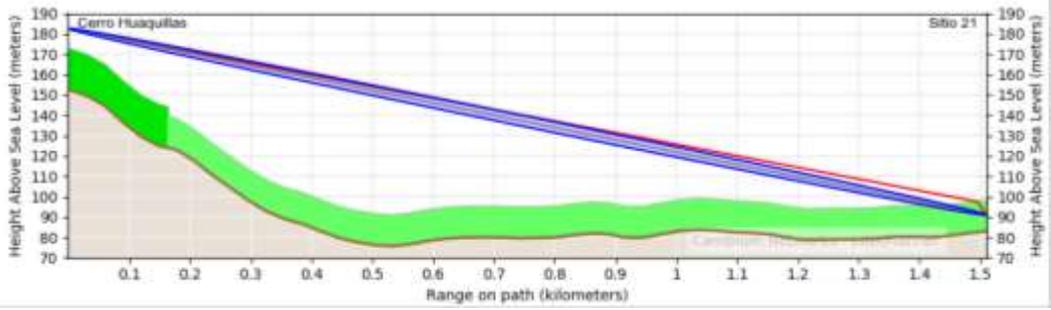
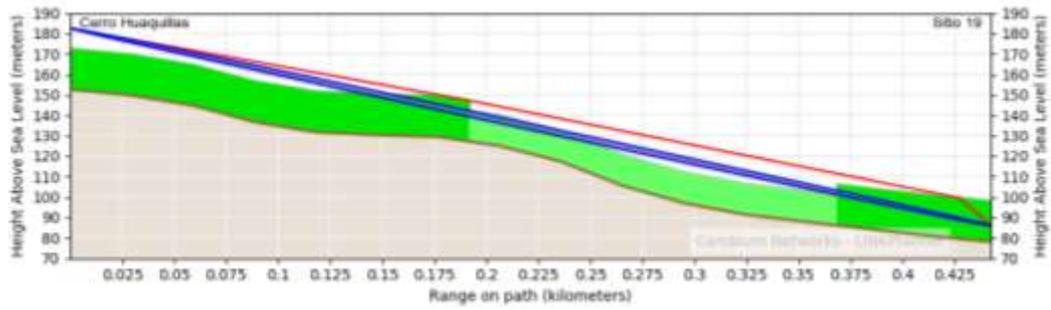
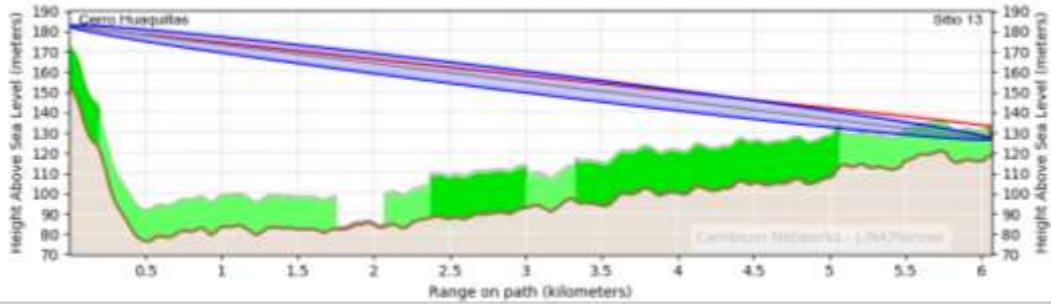
ANEXO 1: Perfiles Topográficos de clientes suscriptores.













DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Chávez Andrade Gerardo Antonio**, con C.C: # **0926296302** autor del trabajo de titulación: **Validación de un modelo de propagación empírico, considerando variables ambientales, para las áreas rurales de la cuenca baja del río Guayas en la frecuencia de 5 GHz.** previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 4 de marzo del 2020

f. _____

Nombre: **Chávez Andrade Gerardo Antonio**

C.C: **0926296302**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Validación de un modelo de propagación empírico, considerando variables ambientales, para las áreas rurales de la cuenca baja del río Guayas en la frecuencia de 5 GHz.		
AUTOR(ES)	Chavez Andrade Gerardo Antonio		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	MSc. Luis Córdova Rivadeneira; MSc. Orlando Philco MSc. Manuel Romero Paz		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
CARRERA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TITULO OBTENIDO:	Maestría en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	4 de marzo del 2020	No. DE PÁGINAS:	54
ÁREAS TEMÁTICAS:	Telecomunicaciones, Comunicaciones Inalámbricas, Área Rural, Proveedor de Servicios de Internet.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Modelo de Propagación, 5GHz, Radio, Frecuencia, Antena, ISP.		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>El adecuado diseño y planificación de las redes inalámbricas de área local o WLAN depende principalmente de la precisión de las herramientas de simulación con las que se efectúen los estudios de factibilidad y es en este contexto donde se aprecia la importancia de contar con modelos de propagación confiables y adaptados para los diferentes ambientes de interés donde se implementará un sistema de telecomunicaciones, ya que al contar con un acertado modelo de propagación se conseguirá predicciones de los niveles de señal con un mayor grado de confianza. Para el caso de ambientes exteriores la cantidad de variables como las ambientales, tipo de terreno, vegetación, etc., generan la necesidad de contar con modelos de propagación más específicos como es el caso de la "Cuenca Baja del Río Guayas" considerada en el presente estudio debido a su interés económico y productivo para el Ecuador. En el presente estudio se valida la eficacia de un modelo de propagación empírico elaborado a partir de 310.552 mediciones recolectadas entre noviembre del 2018 y julio del 2019 para 36 clientes suscriptores en la frecuencia de 5GHz, considerando también el efecto que la presencia de lluvia tiene sobre los niveles de señal recibida con el uso de una estación meteorológica. Los resultados obtenidos permiten determinar que el modelo de propagación empírico elaborado presenta un mayor nivel de efectividad, para el ambiente y frecuencia considerados, que varios de los modelos más conocidos y ampliamente utilizados.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-995753347	E-mail: gerachav@gmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN	Nombre: Romero Paz Manuel de Jesús		
	Teléfono: +593-994606932		
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			