



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA 4G EN EL
VALLE DE TUMBACO.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Telecomunicaciones

AUTOR: ISAAC ENMANUEL CALDERÓN LITA.

TUTOR: VERÓNICA EMMA SORIA MALDONADO.

Quito – Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.

Yo, Isaac Enmanuel Calderón Lita con documento de identificación N° 1724648702, manifiesto que:

Soy autor y responsable de este trabajo, concedo autorización expresa a la Universidad Politécnica Salesiana para utilizar, difundir, reproducir o publicar, sin propósitos lucrativos, la totalidad o parte de este trabajo de titulación.

Quito, 15 de febrero del año 2024.

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, reading "Isaac Calderón", written over a horizontal line.

Isaac Enmanuel Calderón Lita

1724648702

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Isaac Enmanuel Calderón Lita con documento de identificación N° 1724648702, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: "Análisis comparativo de modelos de propagación para 4G en el valle de Tumbaco." el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 de febrero del año 2024.

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink that reads "Isaac Calderon". The signature is written in a cursive style and is underlined with a single horizontal line.

Isaac Enmanuel Calderón Lita

1724648702

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Verónica Emma Soria Maldonado con documento de identificación N°1715185961, docente de la Universidad Politécnica Salesiana , declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA 4G EN EL VALLE DE TUMBACO, realizado por Isaac Enmanuel Calderón Lita, con documento de identificación N° 1724648702, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 de febrero del año 2024.

Atentamente,



—
Ing. Verónica Emma Soria Maldonado, MSc

1715185961

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación especialmente a mi madre Adriana Lita y abuela Rosario Bustamante que han sido las mujeres que siempre me apoyaron en todas mis metas y mis logros, tanto en mi periodo educativo, personal y profesional, sé que desde el cielo mi abuela me acompaña dándome fuerzas a mí y a mi familia para poder seguir adelante sin miedo a los errores.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mis padres que siempre han apoyado a lo largo de este camino, que siempre creyeron en mí y me dieron las fuerzas y la confianza para no rendirme, también agradezco a mis abuelitos que son el mayor ejemplo de superación y a pesar de que mi abuelita ya partió al cielo, me ayuda a no rendirme y seguir adelante.

Agradezco a mi compañero que hice en la universidad ya que son con las personas con las que me puedo expresar sin miedo a ser juzgado, son una parte muy importante en todo este trayecto ya que hacía que la universidad fuera menos complicada, gracias por siempre estar ahí en los buenos y malos momentos y espero poder vernos en un futuro en el mundo laboral y seguirnos llevando como lo hacemos ahora.

Por último, agradezco a todos los ingenieros que pude conocer a lo largo de la carrera, son un gran ejemplo para seguir y me llena de orgullo poderlos llamar amigos, ojalá algún día poder ser tan bueno como lo son ustedes y si la vida lo permite espero poder trabajar con ustedes y poderles demostrar que todo lo que me enseñaron es muy útil.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido

CAPÍTULO 1	12
1.1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.1.1 PROBLEMA DE ESTUDIO	12
1.2. OBJETIVOS.....	13
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3. JUSTIFICACIÓN	13
1.4. METODOLOGÍA.....	14
1.5. MARCO CONCEPTUAL.....	15
1.5.1 COMUNICACIONES MÓVILES	15
1.5.2 DESVANECIMIENTOS	17
1.5.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN:.....	19
CAPITULO 2	25
2.1 SITUACIÓN ACTUAL:	25
2.2 APLICACIÓN POR USAR:.....	29
2.3 DEFINIR DISTANCIAS	31

CAPITULO 3	32
3.1 CÁLCULOS.....	32
3.1.1 CONECEL	33
3.1.2 OTECEL	35
3.1.3 CNT.....	36
3.2 BALANCE DE POTENCIAS	37
3.3 COMPARACIÓN.....	37
3.4 SIMULACIÓN.....	48
CAPITULO 4	49
CONCLUSIONES	49
RECOMENDACIONES	50
BIBLIOGRAFIA	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cobertura de Conecel en el Ecuador	16
Figura 2: Cobertura de CNT en el Ecuador.	17
Figura 3:Cobertura de Movistar en el Ecuador.	17
Figura 4:Efecto de desvanecimiento por trayectos múltiples	18
Figura 5:Evolución de líneas activas por tecnología.....	26
Figura 6:Evolución de RB instaladas	26
Figura 7:Cobertura de CNT y Otecel en el valle de Tumbaco.	27
Figura 8:Cobertura de CONECEL en el valle de Tumbaco.	28
Figura 9:Área destinada para la toma de muestras.....	29
Figura 10:Detalle de datos NetMonitor.	29
Figura 11:Historial NetMonitor.	31
Figura 12: Mapa NetMonitor.....	31
Figura 13:Recorrido realizado separado cada 50 m.	32
Figura 14: Conexión de RB con el punto de muestra.	33
Figura 15: Handover o Handoff.....	33
Figura 16: Distribución antenas CONECEL.....	34
Figura 17:Distribución antena Otecel.	35
Figura 18:Distribución de antenas CNT.	36
Figura 19: Diagrama de flujo para la simulación de cálculos	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Exponente de pérdidas para distintos ambientes.....	19
Tabla 2: Líneas activas y población en todo el país	26
Tabla 3: Valor de umbral de RSRQ	30
Tabla 4: Variables para los cálculos de Conecel.	34
Tabla 5: Variables para los cálculos de Otecel.	35
Tabla 6: Variables para los cálculos de CNT.....	36
Tabla 7: Variables para el Balance de potencias.	37
Tabla 8: promedio de pérdidas para cada operadora y cada modelo de propagación.	45
Tabla 9: Compración de los errores con diferentes modelos de propagación.....	47

RESUMEN

El siguiente proyecto habla sobre la evolución de las comunicaciones móviles 1G, 2G, 3G y 4G con sus respectivas características utilizadas para la comunicación móvil, también se analiza el estado actual de las operadoras Conecel, Otecel y CNT ya que estas se encargan de la cobertura en el Ecuador, se explica los conceptos de desvanecimientos tanto a pequeña como a gran escala, centrándose en el desvanecimiento por trayectos múltiples que nos explica como el entorno afecta a la transmisión de las señales, se analiza tres modelos de propagación que pueden ser utilizados en área suburbanas en este proyecto se utilizaron los modelos de propagación Okumura-Hata, Cost 231-Hata y Walfisch-Ikegami, se explica las variables de cada modelo y sus parámetros. En el capítulo 2 se encuentra la situación actual en la distribución de RB de cada operadora a lo largo del país y el estudio se centra en el área más concurrida del valle de Tumbaco ya que con el aumento de población, también creció la demanda de edificaciones con mayor tamaño a las que ya existían y pasa de un área rural a un área suburbana, para el tema de cálculos se creó un código que facilite la obtención de pérdidas y el balance de potencias, con esto se consigue el error y se puede comparar y determinar el mejor de modelo de propagación para el valle de Tumbaco y la operadora que mejor cobertura tiene en el área.

ABSTRACT

The following project talks about the evolution of mobile communications 1G, 2G, 3G and 4G with their respective characteristics used for mobile communication, it also analyzes the current status of the operators Conecel, Otecel and CNT as these are responsible for coverage in Ecuador, it explains the concepts of fading both small and large scale, It focuses on multipath fading, which explains how the environment affects the transmission of signals. Three propagation models that can be used in suburban areas are analyzed in this project, the Okumura-Hata, Cost 231-Hata and Walfisch-Ikegami propagation models were used. Chapter 2 shows the current situation in the distribution of BR of each operator throughout the country and the study is focused on the busiest area of the Tumbaco valley, since with the increase in population, the demand for larger buildings has also grown, and the area is moving from a rural area to a suburban area, For the calculations, a code was created to facilitate the obtaining of losses and the balance of powers, with this the error is obtained and the best propagation model for the valley of Tumbaco and the operator that has the best coverage in the area can be compared and determined.

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

1.1.1 PROBLEMA DE ESTUDIO

La comunicación es uno de los factores más importante para las personas y desde 1897 que Guglielmo Marconi logro demostrar la capacidad de las radios para comunicarse continuamente entre barcos, la comunicación entre personas que se encuentran en movimiento ha evolucionado notablemente ha esto se lo denomina comunicación inalámbrica y se basa en la transferencia de diferente tipo de información sin la ayuda de cables, este concepto normalmente se lo abrevia como “inalámbrico”, dentro de este término existen varios tipos de dispositivos fijos, radios bidireccionales , asistentes personales digitales, redes inalámbricas y teléfonos móviles[1].

Según la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) en el reporte estadístico mensual de febrero del 2023 en el Ecuador hay 3 compañías más utilizadas que operan en la red celular con tecnología long term evolution (LTE) estas son, Otecel en la frecuencia de 1900 MHz en la banda 2, CNT en la frecuencia de 1700/2100 MHz en la banda 4 y Conecel en la frecuencia de 1700/2100 MHz en la banda 4, todas estas usadas para brindar el servicio de datos móviles a los usuarios.[2]

En los últimos años el valle de Tumbaco ha tenido un gran aumento de población, actualmente habitan 80.000 personas sin tomar en cuenta a las personas extranjeras, esto ha generado que exista un aumento en la construcción de hoteles, oficinas, supermercados y que las edificaciones ya existentes deban invertir en remodelaciones y nuevas construcciones, como consecuencia es inevitable el aumento de las pérdidas en las señales emitidas por el transmisor y ocasiona que la potencia de recepción sea menor para todas las personas[3].

Para poder brindar la cobertura que requiere el valle de Tumbaco, se debe probar varios modelos de propagación que sean compatibles con áreas suburbanas, estos permiten el cálculo de pérdidas y potencias, facilitando la identificación del modelo óptimo para dicha área, ya que no existe uno específico que se acople a las características y condiciones actuales del valle de Tumbaco[4].

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar los valores obtenidos mediante diferentes modelos de propagación, por medio de los resultados de potencia medidos utilizando aplicaciones móviles, para definir el modelo que mejor se ajusta a las características.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros necesarios para el uso de los diferentes modelos de propagación.
- Utilizar diferentes tipos de software en celulares que se centren en la obtención de valores como pérdidas y medición de potencias.
- Comparar los diferentes modelos de propagación para encontrar el área donde se encuentra la menor potencia en el valle de Tumbaco.
- Establecer que modelo de propagación es más eficiente en el valle de Tumbaco

1.3. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día es impensable que una persona u organización no tenga acceso a una red en cualquier lugar, esto se debe al despliegue y a la cobertura que han tenido los operadores de telefonía móvil a lo largo del país, buscando que la mayor parte de usuarios puedan acceder red móvil con tecnología 4G LTE[5].

Debido a las nuevas tecnologías la potencia se ha vuelto uno de los factores más importantes para las personas, permitiéndoles tener la mejor experiencia posible para la emisión y recepción de datos, para garantizar lo anteriormente mencionado se hace uso de los modelos y métodos de propagación, obteniendo como resultado innovaciones en las comunicaciones inalámbricas de grandes empresas en este caso Movistar, Claro y CNT, pero en ocasiones estas redes inalámbricas con tecnología 4G no cubren con las necesidades y la calidad de servicio a los usuarios, por este motivo se debe realizar una

investigación de los modelos de propagación para poder analizar como la red se adapta a su entorno y establecer el modelo más recomendable en el valle de Tumbaco teniendo en cuenta sus características[6].

1.4. METODOLOGÍA

Para este proyecto se adoptó un paradigma de investigación positivista con una investigación de tipo experimental, el alcance descriptivo y como unidad de análisis se tomó en cuenta las pérdidas y el valor de propagación de cada modelo.

- Procedimiento:
 1. **Recolección de datos:** Se utilizo diferentes tipos de documentación como artículos, libros, tesis y reportes mensuales con el fin de adquirir conocimiento sobre diferentes modelos de propagación.
 2. **Definición del área:** Esto se realiza para poder establecer un perímetro donde se recolectará datos dependiendo las características del lugar, en este caso es el valle de Tumbaco un área anteriormente rural, pero con el aumento de población se ha convertido en un área suburbana.
 3. **Herramientas:** Para poder conseguir los datos tanto de las antenas como la señal Se hará uso de diferentes aplicaciones móviles, con estas se conseguirá la banda en la que se encuentra la señal, ubicación de las estaciones base, cobertura de la señal según la ubicación, pérdidas de la señal, el operador y el tipo de señal.
 4. **Modelos de propagación:** Ya que la medición de la cobertura se realizará en el valle de Tumbaco se debe seleccionar modelos que se acoplen al entorno por medir, en este caso se usará los modelos Okumura-Hata, COST 231-Hata y COST 231-WI ya que son específicamente para áreas suburbanas.

5. **Simulación:** Con los datos conseguidos por las mediciones se podría hacer una comparación entre los datos teóricos obtenidos en la simulación contra los datos medidos y así conseguir un panorama más amplio del cambio o de la similitud que hay.

1.5. MARCO CONCEPTUAL

1.5.1 COMUNICACIONES MÓVILES

Las “comunicaciones móviles” por definición se refiere a un enlace de radiocomunicación entre dos dispositivos. De estos, al menos uno puede estar en movimiento o en lugares que no se encuentren definidos, y el otro puede que sea estacionario, como una estación base, esta definición se adapta a la comunicación de móvil a móvil que muchas de las veces se trata de una comunicación de móvil a fijo y luego a móvil otra vez, y también se adapta a la comunicación de fija a móvil, pero ¿Qué es el servicio móvil?, según el reglamento de radiocomunicaciones (RR) es un servicio de radiocomunicación entre estaciones en movimiento y estaciones fijas o simplemente entre estaciones en movimiento, las estaciones que se encuentran en movimiento pueden estar en embarcaciones, automóviles u otros vehículos, incluso pueden ser llevadas por personas.[7]

Se debe tener en cuenta que las comunicaciones móviles se deben regir por un reglamento ya que ocupan el espectro radioeléctrico, siendo este un bien público y al mismo tiempo un recurso escaso, así se evita la insatisfacción tanto de consumidores como de usuarios, brindado una competencia justa y evitando que exista un monopolio.[7]

En el presente, las comunicaciones móviles no solo facilitan la transmisión de voz y datos, sino que también comúnmente se las usa para transmitir señales de móviles, TV, sensores, sistemas domóticos, entre otros. Para que todos estos aparatos puedan transmitir deben encontrarse dentro del área de cobertura de una estación de radiocomunicación, cada una de estas estaciones dividen el territorio de servicio (área de cobertura) en celdas, por lo tanto cuando un usuario de celular se mueve dentro de esta área de cobertura se conectará a la estación correspondiente a la celda y, cuando este se desplace y logre salir a la celda contigua, este se conectará a la estación encargada de esa área, en otras palabras la nueva estación tomará el relevo[8].

La continua evolución de la red móvil a fines de la década de 1990 con el surgimiento de los teléfonos móviles ya ha tenido cinco avances importantes en tecnología comenzando desde 1G/2G donde se empezaba a utilizar canales de voz digitales regidos por el estándar del sistema mundial de comunicaciones móviles (GSM), continuando con 3G recibiendo un aumento en la velocidad de transmisión, convirtiéndola en una tecnología bastante flexible utilizando la técnica de acceso múltiple

por división de código (CDMA) y desarrollando la tecnología del sistema universal de telecomunicación móvil (UMTS), actualmente en la mayor parte del Ecuador se usa la tecnología 4G, este es un sistema basado en IP dando a los usuarios mayor velocidad de transmisión, permitiéndoles tener información en cualquier momento y en cualquier lugar[2].

Actualmente las redes móviles que se utilizan en la mayor parte del Ecuador son 3G,4G y 4G LTE utilizando el estándar FDD que permite el uso de diferentes bandas de frecuencia y se puede alcanzar grandes distancias entre el móvil y la radio base (RB), pero si se compara con otros países dentro de América latina se evidencia claramente que estamos muy retrasados al resto, según un artículo del portal web “La República” publicado el 2 de septiembre del 2023, Ecuador se encuentra antepenúltimo en una lista de países que lideran “la carrera por el 5G”, este artículo indica que Ecuador hasta esa fecha no tiene ninguna red 5G activa y tampoco está en espera de dicha tecnología, esto se puede comprobar con ayuda de diferentes softwares en este caso utilizaremos “nPerf”, este tiene una base de datos donde se encuentran la cobertura que ofrecen las diferentes compañías líderes de red móvil en el Ecuador y muestra con claridad que Conecel tiene el 55.9% de participación de mercado en internet móvil y es la compañía con mayor cobertura en todo el país, seguida por Otecel con participación del 30.3% y, por último CNT con un 13.8% de participación .[9]



Figura 1: Cobertura de Conecel en el Ecuador

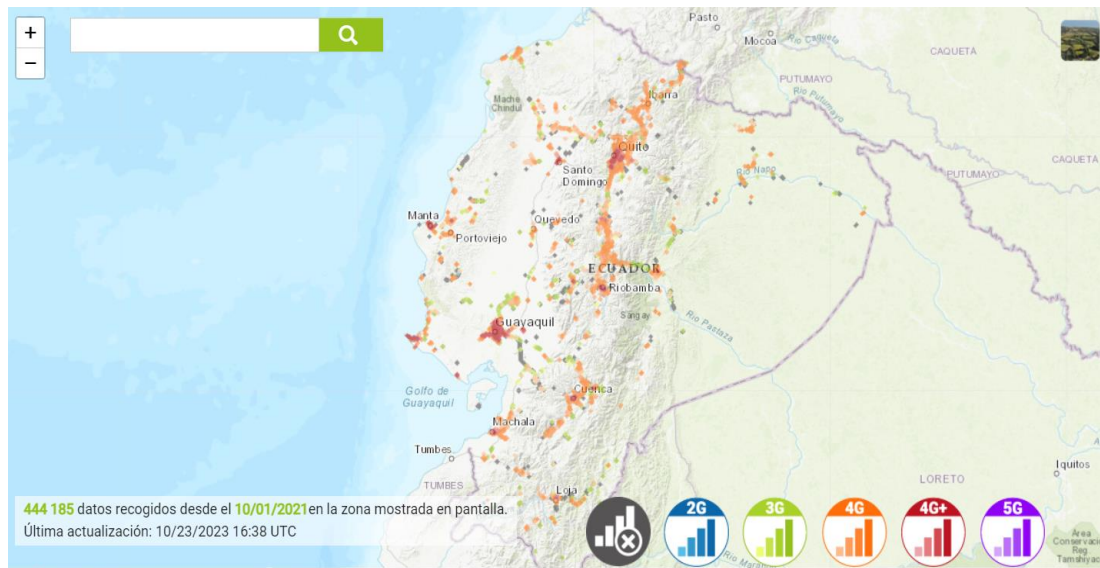


Figura 2: Cobertura de CNT en el Ecuador.

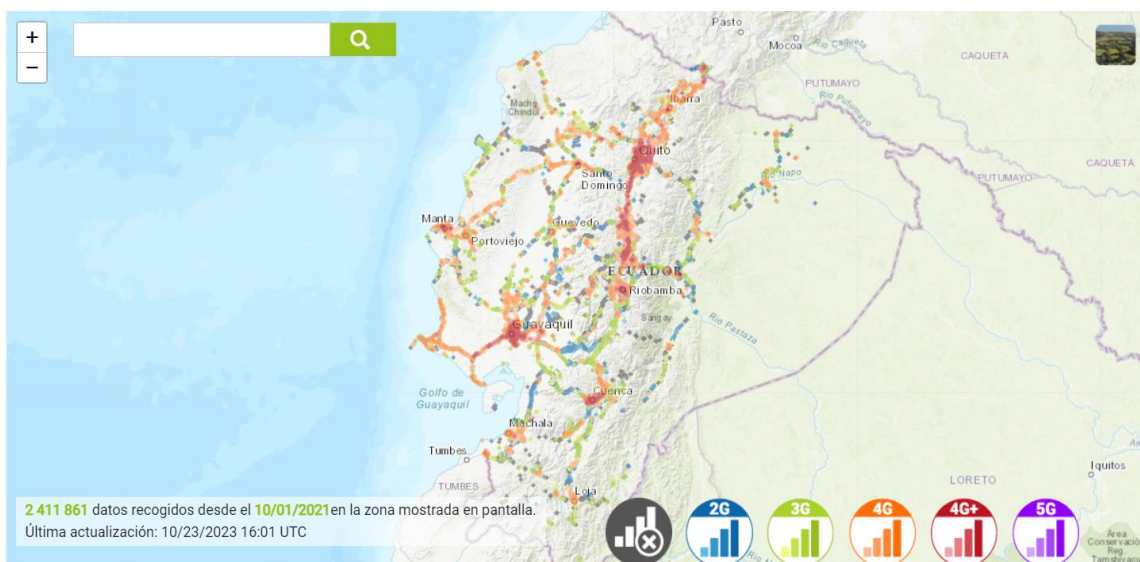


Figura 3: Cobertura de Movistar en el Ecuador.

1.5.2 DESVANECIMIENTOS

Todas las señales que son propagadas se rigen por estos fenómenos: reflexión, difracción, dispersión y sombreado, haciendo que cada onda tenga comportamientos diferentes frente a los obstáculos que se encuentra en todo su trayecto, esto ocasiona que la señal pueda partirse en versiones más pequeñas de la señal original, estas viajan por distintas direcciones hasta llegar a su destino, provocando que el receptor capte señales con amplitudes distintas dentro de un intervalo de tiempo, mientras el receptor se encuentre en movimiento este recibirá señales que difieren con respecto a la distancia y el tiempo y a esto es a lo que se le conoce como desvanecimiento en otras palabras es la variación que ocurre en la potencia de la

señal recibida en el tiempo y según la distancia tanto del transmisor como el receptor el desvanecimiento se clasifica en desvanecimiento a gran escala y pequeña escala[10].

1.5.2.1 DESVANECIMIENTO A PEQUEÑA ESCALA.

Este tipo de desvanecimiento se lo usa para poder describir las fluctuaciones de amplitud y fase más rápidas en pequeñas distancias, ya que estas fluctuaciones se realizan con mayor velocidad, en periodos cortos y la principal causa de esto son los multitrayectos[10].

- **DESVANECIMIENTO POR TRAYECTOS MÚLTIPLES**

Este desvanecimiento es muy común en las comunicaciones inalámbricas, dando como resultado una variación en la propagación de las señales en el dominio del tiempo, el espacio y la frecuencia, esto sucede debido a que en los entornos urbanos y suburbanos la señal se encuentra con varios obstáculos y tienden a tomar caminos diferentes antes de llegar al receptor[7].

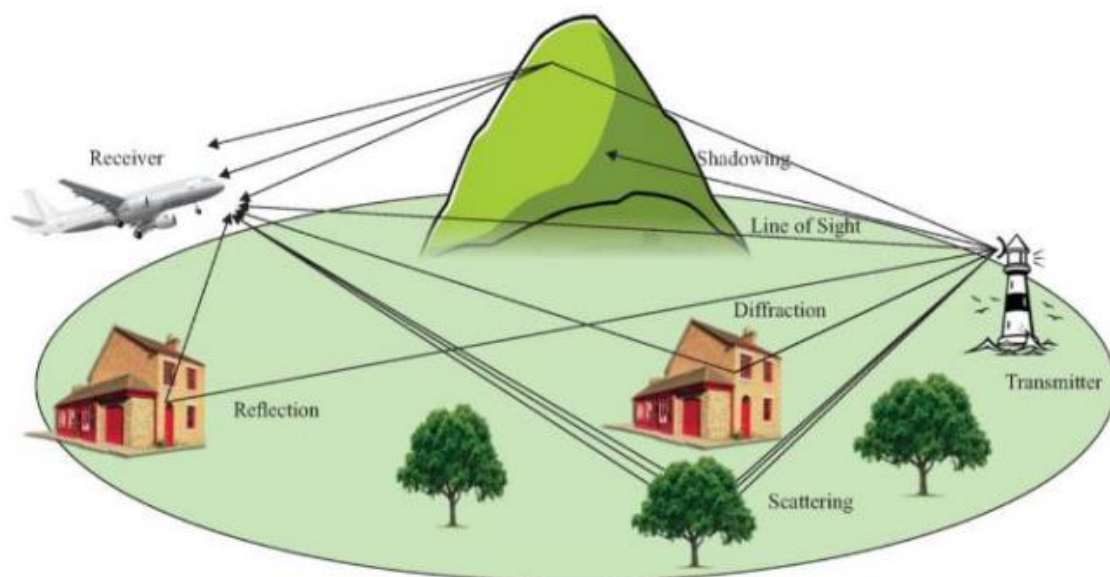


Figura 4: Efecto de desvanecimiento por trayectos múltiples

1.5.2.2 DESVANECIMIENTO A GRAN ESCALA

Este desvanecimiento se caracteriza por la pérdida de señal en función de la distancia (Path Loss) y por el ensombrecimiento que generan los objetos de gran tamaño (Shadowing) como edificios, terrenos, montañas y vegetación. Esta pérdida se ocasiona en el momento que el receptor se mueve por fuera del límite de una celda generada por una estación base, solo hasta que se conecte a la celda contigua[8].

- **PATH LOSS**

Se lo utiliza cuando se tiene un modelo de propagación por espacio libre (LOS) y se desea obtener la pérdida que se genera durante todo el trayecto entre la RB y el receptor móvil, se puede calcular con la siguiente fórmula.

$$Pr = \frac{Pt * Gt * Gr * \lambda^2}{(4\pi)^2 * d^n * L} \quad (1)$$

Como se puede observar en la ecuación 1 la potencia de recepción (Pr) es inversamente proporcional a la distancia (d) y la pérdida (L), esto quiere decir que mientras mayor sea el valor de “d” y el valor de “L” la potencia que recibe el móvil será menor, otros valores que se deben tomar en cuenta son, la potencia de transmisión (Pt), las ganancias tanto de transmisión como de recepción respectivamente (Gt y Gr), la longitud de onda (λ) y el exponente de pérdidas (n), este se define dependiendo el ambiente que se encuentre como se puede ver la tabla 1.

Ambiente	n
Espacio libre	2
Radio celular de área urbana	2.6 – 3.5
Radio celular de área sombreada	3 - 5
Línea de vista en edificio	1.6 – 1.8
Obstruido por edificios	4 - 6
Obstruido por fábricas	2 - 3

Tabla 1: Exponente de pérdidas para distintos ambientes

- **SHADOWING**

El efecto sombra se caracteriza por ser un tipo de desvanecimiento lento debido a su cambio en la pérdida del trayecto medio entre el RB y el receptor móvil, el causante son los obstáculos fijos (construcciones) o móviles (vehículos) que se encuentran en medio de la ruta directa de comunicación.

1.5.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN:

Estos modelos posibilitan la anticipación del comportamiento que las ondas electromagnéticas pueden exhibir al ser emitidas desde el transmisor hasta alcanzar el receptor. Se emplean expresiones matemáticas, esquemas y algoritmos para representar las particularidades de estos comportamientos. Las señales transmitidas pueden sufrir pérdidas debido a las condiciones ambientales, como entornos

urbanos, rurales, bosques, áreas marítimas, alta densidad poblacional y diversas frecuencias de operación.[2].

- **MODELO OKUMURA – HATA:**

Este es considerado un modelo empírico ya que establece una relación entre las variables que ingresan, los diferentes parámetros y las variables de salida, se lo utiliza para la estimación de la pérdida de propagación en una señal en diferentes entornos, el modelo fue desarrollado en Japón por el ingeniero Yoichi Okumura y ampliado por el ingeniero Tatsuhiko Hata, también cuenta con varios factores que se debe tomar en cuenta para la correcta propagación de la señal[11].

- ❖ Rango de frecuencias de 150-2000 MHz.
- ❖ Distancia desde la estación base 1-100KM.
- ❖ Altura de la estación base 30-200m.
- ❖ Altura de la terminal móvil 1-10m.

ÁREA URBANA (Lu):

$$L(\text{urbana})(db) = 69,55 + 26,16\log(f) - 13,82\log(hb) - a(hm) + (44,9 - 6,55 \log(hb))\log(d) \quad (2)$$

Donde:

- **L:** Pérdida que hay en la trayectoria desde el transmisor y el receptor.
- **f (MHz):** Es la frecuencia en la que se transmite la información siempre y cuando cumpla con los factores mencionados.
- **d(Km):** La distancia entre el transmisor y el receptor móvil.
- **hb(m):** Altura de la antena que se encarga de la transmisión.
- **hm(m):** Altura del receptor móvil.
- **a(hm):** Factor de corrección dependiente de hm, f y el área.

ÁREAS SUBURBANAS Y RURALES:

$$a(hm) = (1.1\log(f) - 0.7)hm - 1.56\log(f) - 0.8 \quad (3)$$

ÁREAS URBANAS (f <= 400MHz):

$$a(hm) = 8.29[\log(1.59hm)]^2 - 1.1 \quad (4)$$

ÁREAS URBANAS (f >= 400MHz):

$$a(hm) = 3.2[\log(11.75hm)]^2 - 4.97 \quad (5)$$

ÁREA SUBURBANA (Lsu):

$$L_{su}(db) = L_u - 2 \left[\log\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 - 5.4 \quad (6)$$

ÁREA RURAL (Lr):

$$L_r(db) = L_u - 4.78(\log(f))^2 + 18.33(\log f) - 35.94 \quad (7)$$

• **MODELO COST 231 HATA:**

Es un modelo empírico que se lo utiliza para estimar la pérdida de propagación en diferentes entornos urbanos, suburbanos y rurales, siendo desarrollado como parte de un proyecto de cooperación europea en el campo de la investigación científica y técnica (COST), este es un complemento del modelo de propagación Okumura Hata corrigiendo errores para áreas suburbanas y áreas rurales por esta razón tienen parámetros muy parecidos[8].

$$PL(db) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(hb) - ahm + (44.9 - 6.55 \log_{10}(hb)) \log_{10}(d) + C_m \quad (8)$$

Donde:

- **f:** frecuencia en un rango de 1500-2000 MHz.
- **hb(m):** Tamaño de la antena transmisora.
- **d(Km):** Distancia entre la antena transmisora y receptora.
- **hr(m):** Altura del receptor móvil.

- **Cm:** Para áreas suburbanas y áreas rurales 0db y para áreas urbanas 3db.
- **ahm:** Factor de corrección de la estación móvil dependiendo el área en el que se encuentre.

ÁREA URBANA ($f > 400\text{MHz}$):

$$ahm = 3.20(\log_{10}(11.75(hr)))^2 - 4.97 \quad (9)$$

ÁREA SUBURBANAS Y RURALES:

$$ahm = (1.1\log_{10}(f) - 0.7)(hr) - (1.56\log_{10}(f) - 0.8) \quad (10)$$

- **MODELO COST 231 WALFISH-IKEGAMI (COST-WI)**

Este modelo es una extensión del modelo de propagación COST 231 Hata que se centra más en áreas suburbanas y áreas rurales, mientras que COST-WI considera varios factores adicionales como la ganancia adicional y la dispersión de múltiples trayectorias y normalmente se lo utiliza en áreas urbanas con alta cantidad de habitantes y con gran variedad de obstáculos como árboles y edificios, COST-WI diferencia entre dos modelos, con línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS), igual que los otros modelos debe estar dentro de unos parámetros en frecuencia, altura del transmisor, altura del receptor, distancia entre transmisor y receptor, y la altura relativa del transmisor respectivo a los edificios.[4]

- ❖ **f:** Frecuencia tiene que estar dentro del rango de 800-2000MHz.
- ❖ **d:** Distancia entre el transmisor y receptor 0.02-50Km.
- ❖ **hm:** Altura del receptor 1-3m.
- ❖ **hb:** Altura del transmisor 4-50m.
- ❖ **$\Delta hb > 0$:** Altura relativa del transmisor con respecto a los edificios.

Donde:

- **hr(m):** Altura media de los edificios en el área.
- **w(m):** Ancho de la calle.
- **b(m):** Separación media entre edificios.
- **ϕ (grados):** Ángulo creado por la dirección de propagación y eje de la calle.
- **hb(m):** Altura de la estación base.
- **hm(m):** Altura del receptor o móvil.
- **$\Delta hm(m)$:** $hr - hm$.

- $\Delta h_b(\mathbf{m})$: $h_b - h_r$.
- $l(\mathbf{m})$: Distancia entre el primer y último edificio del trayecto.
- $d(\mathbf{Km})$: Distancia entre la estación base y la estación móvil.
- $f(\mathbf{MHz})$: Frecuencia.

Las pérdidas en este modelo de propagación vienen definidas por dos ecuaciones principales, que dependen si existe línea de vista (LOS) o no hay línea de vista (NLOS):

LOS:

Para este tipo de escenarios la pérdida de propagación (PL) únicamente considera las pérdidas en espacio libre (L_o).

$$PL(db) = L_o \quad (11)$$

$$L_o = 42.64 + 26 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \quad (12)$$

NLOS:

En las pérdidas sin línea de vista se consideran más variables, las pérdidas en espacio libre (L_o), pérdida por difracción desde el tejado hasta la carretera (L_{rts}) y la pérdida multipantalla (L_{msd}) que es ocasionada por la difracción de múltiples obstáculos, dentro de las pérdidas L_{rts} y L_{msd} existen otro tipo de pérdida con condiciones que se deben cumplir.

$$PL(db) = \begin{cases} L_o + L_{rts} + L_{msd} & \text{cuando } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_o & \text{cuando } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$L_o = 32.45 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \quad (14)$$

L_{rts} :

Toma en cuenta w y la orientación de propagación del rayo, se basa en los principios de la difracción tejado-calle.

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log(\Delta h_m) + L_{ori} \quad (15)$$

- **Lori:**

Factor de corrección y se rige por condiciones del ϕ .

$$Lori = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & \text{para } 0^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (16)$$

Lmsd:

La pérdida por difracción multipantalla como su nombre lo menciona se ocasiona por la difracción de múltiples obstáculos y al igual que Lrts si su valor es menor o igual a cero Lmsd=0

$$Lmsd = Lbsh + k_a + k_d \log_{10}(d) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b) \quad (17)$$

- **Lbsh:**

$$Lbsh = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{para } h_b > h_r \\ 0 & \text{para } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (18)$$

- **k_a:**

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_b > h_r \\ 54 - 0.8\Delta h_b & \text{para } h_b \leq h_r \text{ y } d \geq 0.5Km \\ 54 - 0.8\Delta h_b(d/0.5) & \text{para } h_b \leq h_r \text{ y } d < 0.5Km \end{cases} \quad (19)$$

- **k_d:**

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_b > h_r \\ 18 - 15(\Delta h_b/hr) & \text{para } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (20)$$

- **k_f:**

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7((f/925) - 1) & \text{para áreas de tamaño medio y entorno suburbano} \\ -4 + 1.5((f/925) - 1) & \text{para centros metropolitanos} \end{cases} \quad (21)$$

En la ecuación el término k_a indica el crecimiento de la pérdida que se da en el trayecto para el caso de estaciones bases que se encuentran ubicadas por debajo de la altura media de los edificios, mientras k_d y k_f regulan la influencia en Lmsd de la distancia y la frecuencia respectivamente.

En el cálculo de la altura media de los edificios (hr) se debe tener en cuenta si el tejado es plano o inclinado y está dado por la siguiente ecuación:

$$h_r = 3 X (\#depisos) + \text{alturadeltecho} \quad (22)$$

$$\text{alturadeltecho}(m) = \begin{cases} 3 \text{ en techo inclinado} \\ 0 \text{ ten echo plano} \end{cases} \quad (23)$$

Recomendaciones:

- Para el cálculo del ancho de la calle (w) se lo puede realizar de siguiente manera:

$$w = b/2 \quad (24)$$

- Cuando el ángulo creado por la dirección de propagación y eje de la calle (ϕ) no este especificado por lo general se coloca 90° [12].

Medidas de calidad:

CAPITULO 2

2.1 SITUACIÓN ACTUAL:

En el Ecuador a partir de la aparición de coronavirus la necesidad en las personas de tener una mejor cobertura aumentó, ya que todas las actividades cotidianas como el trabajo, la educación, entretenimiento, compras, servicios públicos e investigación, pasaron a realizarse a través de la red, esto se puede corroborar con la gráfica 5 que indica las líneas activas por tecnología, emitidas por la ARCOTEL, donde se indica que en el 2015 aparecieron las primeras 2,000,000 de líneas activas en la tecnología LTE, teniendo un crecimiento de 500,000 usuarios al año hasta el 2018, donde el crecimiento aumentó en 1,500,000 usuarios dando como resultado que a principios del 2019 existan 3,500,000 líneas activas que cuentan con tecnología LTE[8].

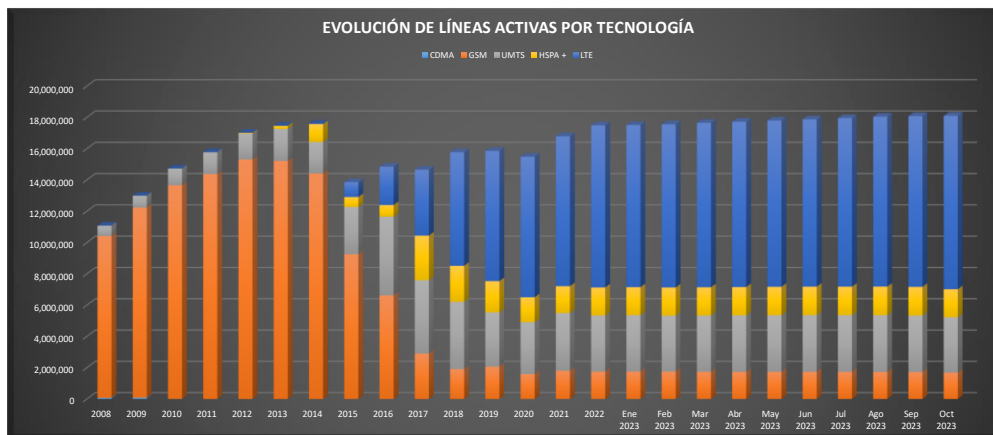


Figura 5: Evolución de líneas activas por tecnología.

Esta tendencia de crecimiento continúa hasta el día de hoy, si se comparan las líneas activas que existen desde diciembre del 2021 a octubre del 2023 se puede notar un crecimiento de 1,310,169 de líneas activas, claramente se debe tener en cuenta que en ese periodo de tiempo la población del Ecuador aumentó de 17,510,643 a 18,205,188 dando como resultado que por cada persona que nació entre las fechas mencionadas en promedio tiene 2 líneas activas [10].

MES/AÑO	Total, de líneas activas	Población Nacional
Diciembre 2021	16,789,600	17,510,643
Octubre 2023	18,099,769	18,205,188

Tabla 2: Líneas activas y población en todo el país

Para que estos usuarios puedan disfrutar de una buena cobertura se hace uso de varias Radio Bases (RBs) según el boletín estadístico de SMA publicado en mayo del 2020 a lo largo de todo el territorio nacional se encuentran un aproximado de 18.857 RBs teniendo un crecimiento del 10.48% con respecto al año pasado, estas RBs están distribuidas en 676 parroquias, 221 que son cabeceras cantonales y 455 corresponden a parroquias rurales[13].

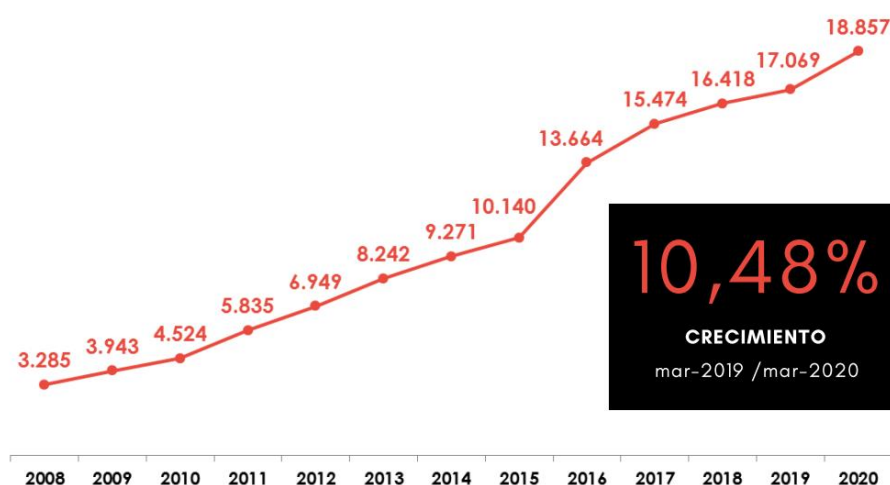


Figura 6: Evolución de RB instaladas

En la provincia de Pichincha a finales del año 2021 se registraron aproximadamente 5.150 RB, mientras que en octubre del 2023 se registra una disminución de RB llegando hasta las 5.026, esto puede ser causado por varios factores, como el desarrollo de la tecnología centrado en la cobertura de las RB o la mejora en la ubicación cubriendo la misma área con menor cantidad, como se mencionó en la introducción en el Ecuador existen tres operadoras que se encargan de la instalación de RB en cada

provincia estas son CONECEL con 10.495 que se encuentran distribuidas a lo largo de Pichincha, de igual manera OTECEL cuenta con 5.807 y por último CNT EP tiene 4.203 RB [11].

En la parroquia de Tumbaco que está delimitada por la línea blanca como se observa en las imágenes 7 y 8, las operadoras distribuyen sus RB de la siguiente manera, OTECEL cuenta con 50 RB mientras que CNT EP tiene 24 RB con frecuencias de 1900MHz y 2100MHz respectivamente, pero el área de cobertura de ambas operadoras es similar, cubriendo toda la zona urbana y algunos barrios periféricos, donde la zona de color verde tiene buena cobertura, la zona morada marca una cobertura media y la zona roja indica una cobertura baja[3].

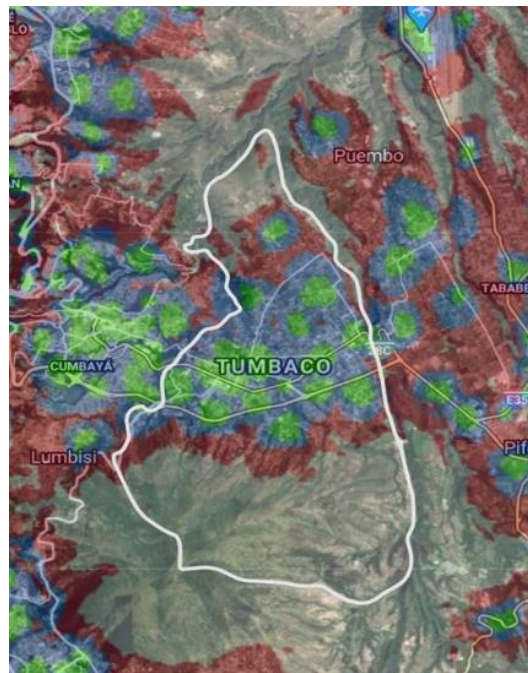


Figura 7: Cobertura de CNT y Otecel en el valle de Tumbaco.

Por otro lado, CONECEL cuenta con 66 RB con frecuencia de 1900 MHz, distribuidas a lo largo del área logrando una mejor cobertura que las dos operadoras mencionadas anteriormente, se debe tener en cuenta que la representación de la cobertura en la imagen 8 es similar a la anterior donde la zona verde indica buena señal, la zona morada muestra la señal media y la zona roja que en este caso es muy poca representa la señal baja[3].

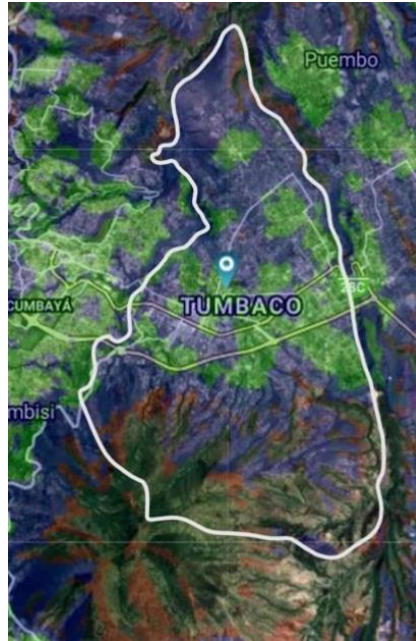


Figura 8: Cobertura de CONECEL en el valle de Tumbaco.

El análisis de la cobertura se centrará en el área donde se encuentran la mayor variedad de altura en edificaciones de la parroquia Tumbaco esto incluye casas, edificios comerciales, hoteles, supermercados, áreas de entretenimiento, colegios y hospitales, Se toma en cuenta la calle Rodrigo de Nuñez ya que se encuentra cerca del registro civil y el hotel Ilalo Garden, ya que el flujo de personas es muy abundante, también se toma en cuenta la calle principal Av. Oswaldo Guayasamín y las calles aledañas Vicente Rocafuerte, Juan Montalvo, Eugenio Espejo, Gonzalo Pizarro y Gaspar de Carvajal, siendo un recorrido de 3.45 Km desde el primer punto de muestras hasta el último, todo esto se puede observar en la imagen 9 donde se delimita con una línea amarilla toda el área de análisis, con la que pretende obtener una idea general de la cobertura en todo Tumbaco.



Figura 9: Área destinada para la toma de muestras

2.2 APLICACIÓN POR USAR:

Para el análisis de la cobertura existen varias opciones de aplicaciones sin importar el sistema operativo (OS), en este caso se usará NetMonitor en un dispositivo Android como herramienta principal para la localización y la obtención de datos de la RB a la cual el móvil se encuentra conectado, intensidad de la señal, tipo de conexión, antenas que se encuentran cercanas, etc[14].

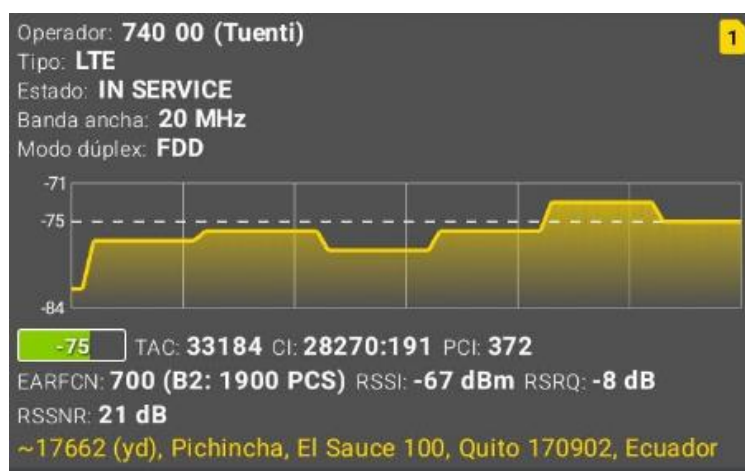


Figura 10:Detalle de datos NetMonitor.

- TAC (Tracking Area Code): Las áreas de seguimiento están conformadas por varios eNodosB y cada una de estas tiene un código único de 16 bits.
- CI (Cell Identifier): Es una combinación de números única usado para la identificación de EB o del sector que se encuentra dentro del área de cobertura de una EB.

- EARFCN (Envolvled-UTRA Absolute Radio Frequency No): Tiene un identificador único para la banda que se encuentra en LTE y la frecuencia en MHz.
- RSSNR (Reference Signal Signal To Noise Ratio): Indica la relación señal a ruido de la señal que recibe el móvil.
- RSSI (Received Signal Strngth Indicator): Este parámetro indica la cantidad promedio de potencia que recibe el móvil.
- RSRQ (Referene Signal Received Quality): Calidad que tiene la señal de referencia.
- PCI (Physical Cell Identity): Valor Pseudo-único para la identificación de células físicas en redes LTE.

El RSRQ es uno de los parámetros más importante ya que permite la definir las celdas que se encuentran disponibles en función de la calidad que tenga la señal,

En la figura 11 se puede ver el historial de la aplicación, en este apartado se almacenan todas las conexiones a RBs que se han realizado, brindando información sobre el estado, el tipo de conexión que se consiguió al momento de estar cerca y la ubicación aproximada de estas, para definir si la calidad es buena o mala se debe regir por la tabla 3.

Nivel de señal	RSRQ (dB)
Excelente	≥ -10
Bueno	$-10 a - 15$
Aceptable	$-15 a - 20$
Malo	≤ -20

Tabla 3: Valor de umbral de RSRQ



Figura 11: Historial NetMonitor.

En la imagen 12 se aprecia el mapa de la aplicación, este indica la RB a la que el móvil se encuentra conectada, una aproximación de la RB y cuantas se encuentran dentro del rango visual.

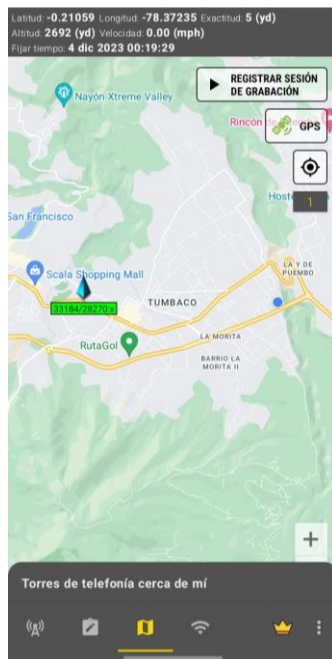


Figura 12: Mapa NetMonitor.

2.3 DEFINIR DISTANCIAS

Como se observa en la imagen 13 el área de medición es el centro de Tumbaco, partiendo desde la RB que se encuentra en la calle Rodrigo Nuñez, en la parte superior de una casa de dos pisos dándole una altura de aproximadamente 17.53 m, para determinar este valor se tomaron muestras de altura con ayuda de la aplicación ARuler, esta permite medir distancia, alturas y profundidad a través de la cámara del



Figura 14: Conexión de RB con el punto de muestra.

Como se observa en la imagen 14 hay dos antenas y cada una esta conectada a diferentes puntos de muestra, esto se da por el handover o el handoff que es un sistema usado en las comunicaciones móviles para transferir el servicio de una RB a otra cuando decaiga la calidad del servicio que están brindando, este sistema garantiza que el móvil al momento de trasladarse no pierda la conexión en ningún momento.

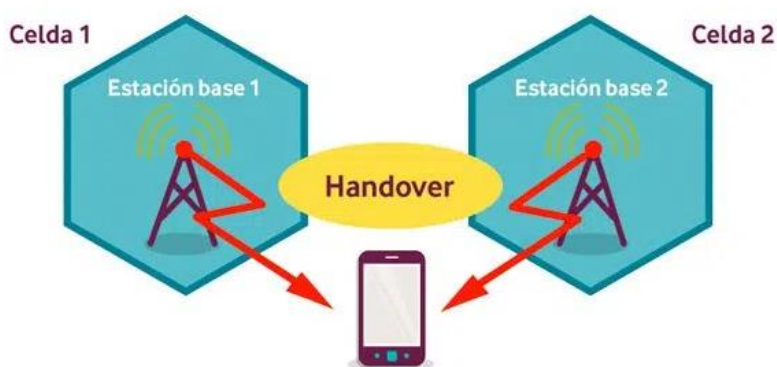


Figura 15: Handover o Handoff

3.1.1 CONECEL

Esta operadora cuenta con la mayor cantidad de RB distribuidas a lo largo del país, por lo tanto, es lógico que tenga mayor cantidad de RB en el valle de Tumbaco que el resto de las operadoras, como se observa en la imagen 16, CONECEL cuenta con 6 RB para cubrir todo el centro de Tumbaco, por esta razón la potencia de recepción medida se mantiene estable y hay muy pocos lugares con baja cobertura.



Figura 16: Distribución antenas CONECEL.

Para calcular las pérdidas en los diferentes modelos de propagación se debe tener en cuenta los parámetros y las variables de cada uno de estos en la tabla 2 se pueden observar las variables utilizadas en cada modelo de propagación.

Variabes	OKUMURA-HATA	COST 231 HATA	COST-WI
Frecuencia (MHz)	1900	1900	1900
Distancia (m)	0.21	0.21	0.21
Altura antena (m)	20	20	20
Altura móvil (m)	1.5	1,5	1.5
Altura relativa del Tx con respecto a los edificios (m)	-	-	11
Separación media entre edificios (m)	-	-	15.28
Ángulo (grados)	-	-	90°
Distancia entre el primer y último edificio (m)	-	-	1040

Tabla 4: Variables para los cálculos de Conecel.

3.1.2 OTECEL

Esta operadora para dar cobertura al valle de Tumbaco solo utiliza una antena de gran alcance que se encuentra ubicada en Cumbayá, por este motivo la baja cobertura es una constante en varias partes del área de estudio.



Figura 17: Distribución antena Otecel.

La principal diferencia entre la tabla 2 y la tabla 3 es la distancia ya que la antena de transmisión se encuentra más alejada que en el caso de Conecel.

Variabes	OKUMURA-HATA	COST 231 HATA	COST-WI
Frecuencia (MHz)	1900	1900	1900
Distancia (m)	1.21	1.21	1.21
Altura antena (m)	20	20	20
Altura móvil (m)	1.5	1,5	1.5
Altura relativa del Tx con respecto a los edificios (m)	-	-	11
Separación media entre edificios (m)	-	-	15.28
Ángulo (grados)	-	-	90°
Distancia entre el primer y último edificio (m)	-	-	1040

Tabla 5: Variables para los cálculos de Otecel.

3.1.3 CNT

Para cubrir toda el área CNT utiliza dos antenas, por esta razón la variable de distancia es muy corta, otra variable que cambia con respecto al resto de operadoras es la frecuencia ya que esta trabaja en 2100 MHz en banda 4.



Figura 18: Distribución de antenas CNT.

Variabes	OKUMURA-HATA	COST 231 HATA	COST-WI
Frecuencia (MHz)	2100	2100	2100
Distancia (m)	0.35	0.35	0.35
Altura antena (m)	20	20	20
Altura móvil (m)	1.5	1,5	1.5
Altura relativa del Tx con respecto a los edificios (m)	-	-	11
Separación media entre edificios (m)	-	-	15.28
Ángulo (grados)	-	-	90°
Distancia entre el primer y último edificio (m)	-	-	1040

Tabla 6: Variables para los cálculos de CNT.

En las tablas número 4, 5 y 6 se presentan los promedios de las mediciones que se realizaron, estos fueron utilizados para los cálculos en cada modelo de propagación con una excepción, el valor de la distancia que se encuentra dentro de la tabla no fue el que se utilizó en los cálculos, para esa variable se tomó la distancia entre el RB y el receptor móvil que se encuentren dentro del rango de conexión.

3.2 BALANCE DE POTENCIAS

Consiste en una ecuación que indica cual es la relación entre la potencia transmitida (Ptx), la pérdida de propagación (este valor es obtenido después de resolver todas las ecuaciones en cada modelo de propagación) (L) y las ganancias tanto de transmisión como de recepción (Gtx y Grx). La ecuación tiene como objetivo, asegurar que la potencia recibida (Prx) que llega al móvil sea óptima y lo más fuerte posible para garantizar una comunicación que sea confiable.

$$Prx = Ptx - L + Gtx + Grx \quad (25)$$

Para realizar los cálculos, en la tabla 5 se define la Ptx utilizando la potencia de implementación que los fabricantes utilizan en las operadoras del país, esta puede ir desde 0W hasta los 40W, para L se toman los valores de pérdidas que se obtuvieron de los cálculos en los modelos de propagación y para las ganancias se toma en cuenta el valor que normalmente se utiliza dentro de los parámetros de LTE.

Parámetro	Valor
Ptx	0.03 mw
Gtx	8 dbi
Grx	8 dbi

Tabla 7: Variables para el Balance de potencias.

3.3 COMPARACIÓN

Come se menciona en la sección 3.1 se debe realizar los cálculos de cada modelo de propagación para cada operadora, con el fin de obtener las pérdidas para poder calcular el balance de potencias, a continuación, se mostrará un ejemplo de cómo el código realiza los cálculos.

Conecel:

- **Okumura – Hata**

Para este modelo de propagación primero se debe calcular el factor de corrección que dependiendo del área la fórmula cambia.

$$a(hm) = (1.1\log(f) - 0.7)hm - 1.56\log(f) - 0.8$$

$$a(hm) = (1.1\log(1900) - 0.7)(1.5) - 1.56\log(1900) - 0.8$$

$$a(hm) = 0.0451$$

Ya con este valor se puede calcular las pérdidas en área suburbanas, dentro de esta ecuación esta la variable Lu que son las pérdidas en áreas urbanas, por esta razón se debe calcular primero las pérdidas en áreas urbanas.

$$Lu(db) = 69,55 + 26,16\log(f) - 13.82\log(hb) - a(hm) + (44,9 - 6,55 \log(hb))\log(d)$$

$$Lu(db) = 69,55 + 26,16\log(1900) - 13.82\log(20) - 0.0451 + (44,9 - 6,55 \log(20))\log(0.05)$$

$$Lu(db) = 89.9677 \text{ db}$$

$$Lsu(db) = Lu - 2 \left[\log\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 - 5.4$$

$$Lsu(db) = 89.9677 - 2 \left[\log\left(\frac{1900}{28}\right) \right]^2 - 5.4$$

$$Lsu(db) = 77.85 \text{ db}$$

- **Cost231-Hata**

Este modelo de propagación es un complemento del modelo Okumura-Hata por esta razón las ecuaciones son similares, primero se calcula el factor de correlación para áreas suburbanas.

$$a(hm) = (1.1\log_{10}(f) - 0.7)hr - (1.56\log_{10}(f) - 0.8)$$

$$a(hm) = (1.1\log_{10}(1900) - 0.7)(1.5) - (1.56\log_{10}(1900) - 0.8)$$

$$a(hm) = 0.0451$$

A diferencia del modelo anterior en este no se debe calcular el Lu, se calcula directamente las pérdidas para el área de estudio.

$$PL(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(hb) - ahm + (44.9 - 6.55 \log_{10}(hb)) \log_{10}(d) + Cm$$

$$PL(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(1900) - 13.82 \log_{10}(20) - 0.045 + (44.9 - 6.55 \log_{10}(20)) \log_{10}(0.05) + 0$$

$$PL(dB) = 92.0952$$

- **Walfisch – Ikegami**

Con este modelo de propagación los cálculos son más extensos porque cuenta con muchas variables de complemento y se debe tener en cuenta los parámetros que se mencionaron en el

apartado 1.5.3, la forma más fácil de entender este modelo es resolviendo desde la última ecuación Kf hasta la primera PL.

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7((f/925) - 1) \\ -4 + 1.5((f/925) - 1) \end{cases}$$

$$k_f = -4 + 0.7((1900/925) - 1)$$

$$k_f = -3.2622$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_b > h_r \\ 18 - 15(\Delta h_b/hr) & \text{para } h_b \leq h_r \end{cases}$$

$$k_d = 18$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_b > hr \\ 54 - 0.8\Delta h_b & \text{para } h_b \leq h_r \text{ y } d \geq 0.5Km \\ 54 - 0.8\Delta h_b(d/0.5) & \text{para } h_b \leq h_r \text{ y } d < 0.5Km \end{cases}$$

$$k_a = 54$$

$$Lbsh = \begin{cases} -18\log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{para } h_b > h_r \\ 0 & \text{para } h_b \leq h_r \end{cases}$$

$$Lbsh = -18\log_{10}(1 + 11)$$

$$Lbsh = -19.4253$$

$$Lmsd = Lbsh + k_a + k_d \log_{10}(d) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b)$$

$$Lmsd = -19.4253 + 54 + 18 \log_{10}(0.05) + (-3.2622 \log_{10}(1900)) - 9 \log_{10}(15.28)$$

$$Lmsd = -10.1967$$

$$Lori = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & \text{para } 0^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases}$$

$$Lori = 4.0 - 0.114(90 - 55)$$

$$Lori = 0.01$$

$$Lrts = -16.9 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log(\Delta hm) + Lori$$

$$Lrts = -16.9 - 10 \log_{10}(7.64) + 10 \log_{10}(1900) + 20 \log(7.5) + 0.01$$

$$Lrts = 24.5678$$

$$Lo = 32.45 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f)$$

$$Lo = 32.45 + 20 \log_{10}(0.05) + 20 \log_{10}(1900)$$

$$Lo = 72.0045$$

$$PL(db) = \begin{cases} Lo + Lrts + Lmsd & \text{cuando } Lrts + Lmsd > 0 \\ Lo & \text{cuando } Lrts + Lmsd \leq 0 \end{cases}$$

$$PL(db) = 72.0045 + 24.5678 + (-10.1967)$$

$$PL(db) = 86.3756 \text{ dB}$$

Para la pérdida básica donde se suma las pérdidas en espacio libre (Lo), La pérdida por difracción tejado – calle ($Lrts$) y la pérdida por difracción multipantalla ($Lmsd$), se debe tener en cuenta si la RB tiene línea de vista con el receptor móvil (LOS) o si no tiene línea de vista (NLOS).

Otecel:

- **Okumura – Hata**

$$a(hm) = (1.1 \log(f) - 0.7)hm - 1.56 \log(f) - 0.8$$

$$a(hm) = (1.1 \log(1900) - 0.7)(1.5) - 1.56 \log(1900) - 0.8$$

$$a(hm) = 0.0451$$

$$Lu(db) = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13.82 \log(hb) - a(hm) + (44,9 - 6,55 \log(hb)) \log(d)$$

$$Lu(db) = 69,55 + 26,16 \log(1900) - 13.82 \log(20) - 0.0451 + (44,9 - 6,55 \log(20)) \log(0.57)$$

$$Lu(db) = 128.4160 \text{ dB}$$

$$L_{su}(db) = L_u - 2 \left[\log \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5.4$$

$$L_{su}(db) = 128.4160 - 2 \left[\log \left(\frac{1900}{28} \right) \right]^2 - 5.4$$

$$L_{su}(db) = 116.3065 \text{ db}$$

- **Cost231-Hata**

$$a(hm) = (1.1 \log_{10}(f) - 0.7)hr - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8)$$

$$a(hm) = (1.1 \log_{10}(1900) - 0.7)(1.5) - (1.56 \log_{10}(1900) - 0.8)$$

$$a(hm) = 0.0451$$

$$PL(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(hb) - ahm + (44.9 - 6.55 \log_{10}(hb)) \log_{10}(d) + C_m$$

$$PL(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(1900) - 13.82 \log_{10}(20) - 0.045 + (44.9 - 6.55 \log_{10}(20)) \log_{10}(0.57) + 0$$

$$PL(dB) = 130.5436 \text{ dB}$$

- **Walfisch – Ikegami**

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7((f/925) - 1) \\ -4 + 1.5((f/925) - 1) \end{cases}$$

$$k_f = -4 + 0.7((1900/925) - 1)$$

$$k_f = -3.2622$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_b > h_r \\ 18 - 15(\Delta h_b/hr) & \text{para } h_b \leq h_r \end{cases}$$

$$k_d = 18$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_b > hr \\ 54 - 0.8\Delta h_b & \text{para } h_b \leq h_r \text{ y } d \geq 0.5Km \\ 54 - 0.8\Delta h_b(d/0.5) & \text{para } h_b \leq h_r \text{ y } d < 0.5Km \end{cases}$$

$$k_a = 54$$

$$Lbsh = \begin{cases} -18\log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{para } h_b > h_r \\ 0 & \text{para } h_b \leq h_r \end{cases}$$

$$Lbsh = -18\log_{10}(1 + 11)$$

$$Lbsh = -19.4253$$

$$Lmsd = Lbsh + k_a + k_d \log_{10}(d) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b)$$

$$Lmsd = -19.4253 + 54 + 18 \log_{10}(0.57) + (-3.2622 \log_{10}(1900)) - 9 \log_{10}(15.28)$$

$$Lmsd = 8.8275$$

$$Lori = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & \text{para } 0^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases}$$

$$Lori = 4.0 - 0.114(90 - 55)$$

$$Lori = 0.01$$

$$Lrts = -16.9 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log(\Delta hm) + Lori$$

$$Lrts = -16.9 - 10 \log_{10}(7.64) + 10 \log_{10}(1900) + 20 \log(7.5) + 0.01$$

$$Lrts = 24.5678$$

$$Lo = 32.45 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f)$$

$$Lo = 32.45 + 20 \log_{10}(0.57) + 20 \log_{10}(1900)$$

$$Lo = 93.1425$$

$$PL(db) = \begin{cases} Lo + Lrts + Lmsd & \text{cuando } Lrts + Lmsd > 0 \\ Lo & \text{cuando } Lrts + Lmsd \leq 0 \end{cases}$$

$$PL(db) = 93.1425 + 24.5678 + 8.8275$$

$$PL(db) = 126.5379 \text{ dB}$$

CNT:

- **Okumura – Hata**

$$a(hm) = (1.1\log(f) - 0.7)hm - (1.56\log(f) - 0.8)$$

$$a(hm) = (1.1\log(2100) - 0.7)(1.5) - (1.56\log(2100) - 0.8)$$

$$a(hm) = 0.049$$

$$Lu(db) = 69,55 + 26,16\log(f) - 13,82\log(hb) - a(hm) + (44,9 - 6,55 \log(hb))\log(d)$$

$$Lu(db) = 69,55 + 26,16\log(2100) - 13,82\log(20) - 0,049 + (44,9 - 6,55 \log(20))\log(0,4)$$

$$Lu(db) = 123.9536 \text{ dB}$$

$$Lsu(db) = Lu - 2 \left[\log\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 - 5.4$$

$$Lsu(db) = 123.9536 - 2 \left[\log\left(\frac{2100}{28}\right) \right]^2 - 5.4$$

$$Lsu(db) = 111.522 \text{ db}$$

- **Cost231-Hata**

$$a(hm) = (1.1\log_{10}(f) - 0.7)hm - (1.56\log_{10}(f) - 0.8)$$

$$a(hm) = (1.1\log_{10}(2100) - 0.7)(1.5) - (1.56\log_{10}(2100) - 0.8)$$

$$a(hm) = 0.049$$

$$PL(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(hb) - ahm + (44.9 - 6.55 \log_{10}(hb)) \log_{10}(d) + Cm$$

$$PL(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(2100) - 13.82 \log_{10}(20) - 0.049 + (44.9 - 6.55 \log_{10}(20)) \log_{10}(0.4) + 0$$

$$PL(dB) = 126.4176 \text{ dB}$$

- **Walfisch – Ikegami**

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7((f/925) - 1) \\ -4 + 1.5((f/925) - 1) \end{cases}$$

$$k_f = -4 + 0.7((2100/925) - 1)$$

$$k_f = -3.1108$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_b > h_r \\ 18 - 15(\Delta h_b/hr) & \text{para } h_b \leq h_r \end{cases}$$

$$k_d = 18$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_b > hr \\ 54 - 0.8\Delta h_b & \text{para } h_b \leq h_r \text{ y } d \geq 0.5Km \\ 54 - 0.8\Delta h_b(d/0.5) & \text{para } h_b \leq h_r \text{ y } d < 0.5Km \end{cases}$$

$$k_a = 54$$

$$Lbsh = \begin{cases} -18\log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{para } h_b > h_r \\ 0 & \text{para } h_b \leq h_r \end{cases}$$

$$Lbsh = -18\log_{10}(1 + 11)$$

$$Lbsh = -19.4253$$

$$Lmsd = Lbsh + k_a + k_d \log_{10}(d) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b)$$

$$Lmsd = -19.4253 + 54 + 18 \log_{10}(0.4) + (-3.1108 \log_{10}(2100)) - 9 \log_{10}(15.28)$$

$$Lmsd = 6.4199$$

$$Lori = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & \text{para } 0^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases}$$

$$Lori = 4.0 - 0.114(90 - 55)$$

$$Lori = 0.01$$

$$Lrts = -16.9 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log(\Delta hm) + Lori$$

$$Lrts = -16.9 - 10 \log_{10}(7.64) + 10 \log_{10}(2100) + 20 \log(7.5) + 0.01$$

$$Lrts = 25.0025$$

$$L_o = 32.45 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f)$$

$$L_o = 32.45 + 20 \log_{10}(0.4) + 20 \log_{10}(2100)$$

$$L_o = 90.9356$$

$$PL(db) = \begin{cases} L_o + L_{rts} + L_{msd} & \text{cuando } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_o & \text{cuando } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases}$$

$$PL(db) = 90.9356 + 25.0025 + 6.4199$$

$$PL(db) = 122.358 \text{ dB}$$

Todos los cálculos se realizaron con la primera distancia entre la RB y el receptor móvil, estos mismos se deben realizar para cada distancia que se tenga, en la tabla 8 se puede observar un promedio de todas las pérdidas calculadas por modelo de propagación y operadora.

Operadoras	L Okumura - Hata	L Cost231 - Hata	L Walfisch - Ikegami
Conecel	97.42459	111.6616	106.8142
Otecel	127.8863	142.1234	138.634
CNT	106.9571	121.8528	117.5896

Tabla 8: promedio de pérdidas para cada operadora y cada modelo de propagación.

Después obtener todas las pérdidas, se procede a calcular el balance de potencias, para esta ecuación se utiliza la P_{tx} que es la P_{rx} más cercana a la RB, las L que se calculó anteriormente y las G tanto de transmisión como de recepción, a continuación, se presenta un ejemplo de cálculo con la primera pérdida de cada modelo de propagación y cada operadora, se debe tener en cuenta que el balance de potencias se realiza con todas las pérdidas en este caso se utilizó 69 pérdidas por operadora.

Conecel

- Okumura-Hata

$$Prx = Ptx - L + Gtx + Grx$$

$$Prx = -15 - 77.8582 + (8 - 2.15) + (8 - 2.15)$$

$$Prx = -81.15.82$$

- Cost231 - Hata

$$Prx = -15 - 92.0952 + (8 - 2.15) + (8 - 2.15)$$

$$Prx = -95.3952$$

- Walfisch – Ikegami

$$Prx = -15 - 86.3756 + (8 - 2.15) + (8 - 2.15)$$

$$Prx = -89.6756$$

Otecel

- Okumura-Hata

$$Prx = Ptx - L + Gtx + Grx$$

$$Prx = -15 - 116.3065 + (8 - 2.15) + (8 - 2.15)$$

$$Prx = -119.6065$$

- Cost231 – Hata

$$Prx = -15 - 130.5436 + (8 - 2.15) + (8 - 2.15)$$

$$Prx = -133.8436$$

- Walfisch – Ikegami

$$Prx = -15 - 126.5379 + (8 - 2.15) + (8 - 2.15)$$

$$Prx = -129.8379$$

CNT

- Okumura-Hata

$$Prx = Ptx - L + Gtx + Grx$$

$$Prx = -15 - 111.522 + (8 - 2.15) + (8 - 2.15)$$

$$Prx = -114.822$$

- Cost231 – Hata

$$Prx = -15 - 126.4176 + (8 - 2.15) + (8 - 2.15)$$

$$Prx = -129.7176$$

- Walfisch – Ikegami

$$Prx = -15 - 122.358 + (8 - 2.15) + (8 - 2.15)$$

$$Prx = -125.658$$

Posterior a la obtención del balance de potencias se debe realizar una sustracción entre Prx medida y la Prx calculada, esto devolverá el error, que es la discrepancia entre la potencia de recepción medida en el área y la potencia que se espera con respecto al modelo de propagación que se esté utilizando.

Operadoras	Error Okumura-Hata	Error COST-231-Hata	Error COST-WI
CONECEL	13.6376	27.8746	23.0272
OTECCEL	44.0993	58.3364	54.8470
CNT	23.1701	38.0658	33.8026

Tabla 9: Comparación de los errores con diferentes modelos de propagación.

Como se puede observar en la tabla 9 la menor cantidad de error en el valle de Tumbaco se registra con el modelo de propagación Okumura-Hata respectivamente en la operadora Conecel, ya que al estar en una altura más baja que parroquias aledañas como Cumbayá, Puembo o Pifo produce que los receptores móviles sean afectados con mayor medida por el shadowing, Conecel al tener 66 RBs distribuidas por todo Tumbaco es la que mejor cobertura ofrece ya que solo en el área donde se realizó el estudio se encontraban 6 de estas RB brindando el servicio, un factor que dificulta una mejor cobertura por parte de Otecel y CNT es el aumento de población, ya que esto ocasiono que todas las edificaciones crecieran por negocios, vivienda, educación y salud, a pesar de que el país en los últimos años se ha desarrallorado tecnológicamente sigue por debajo de países cercanos como Colombia, Venezuela y Peru[15].

Para el escenario de Tumbaco el modelo de propagación que mejor se ajusta con sus características de entorno es Okumura – Hata ya que los parámetros como la altura del receptos se ajustan de mejor manera, ya que la altura promedio de los edificios es 9m y esto genera un mejor factor de correlación en comparación con los otros modelos de propagación, a diferencia de Walfisch-Ikegami que fue

desarrollado con el objetivo de ser usado en áreas urbanas donde la altura promedio de los edificios es 180m como puede ser Tokio, Yokohama y Osaka a pesar de estas diferencias los errores entre un modelo de propagación y otro solo difiere en 10 dB, por otro lado el modelo que menos se ajusta al entorno es COST231-Hata a pesar de ser un complemento del modelo Okumura-Hata por motivo del cambio en los cálculos las pérdidas son mayores y por lo tanto el error también aumenta.

La segunda operadora con menor error es CNT que a pesar de tener la menor cantidad de RB distribuidas a lo largo del país en el valle de Tumbaco se encuentran 2 haciendo que se la segunda opción más óptima, por último Otecel que solo cuenta con una RB para cubrir toda el área de estudio, esto se puede justificar ya que hasta el 2010 solo existían 49.944 personas y se consideraba un área rural, según los cálculos del GAD de Tumbaco en el año 2020 existirían 80.000 habitantes y por esta razón el aumento de edificaciones es un problema ya que genera muchas pérdidas[3].

3.4 SIMULACIÓN

Los cálculos que se realizan en cada modelo de propagación son muy extensos y se debe llevar a cabo para cada muestra tomada, por este motivo se realizó un código en Python que ayude con la extracción de datos desde archivos .xlsx, los cálculos para encontrar las pérdidas de cada uno de los modelos de propagación, creación de archivos .xlsx donde se almacenaran todas las pérdidas anteriormente calculadas y por último el cálculo de la variación de potencias donde se realiza una resta entre las potencia recibida medida y la potencia recibida calculada.

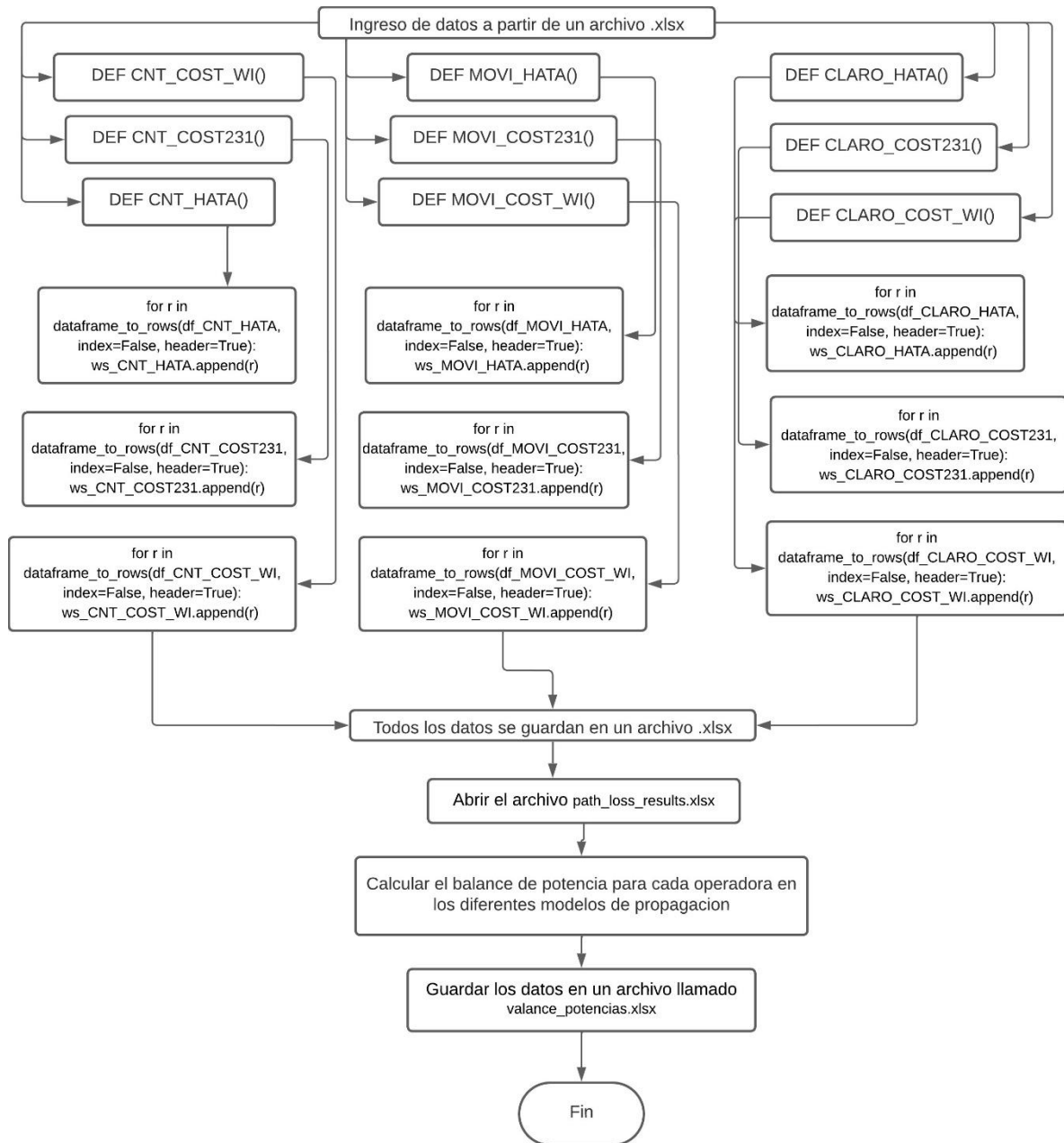


Figura 19: Diagrama de flujo para la simulación de cálculos

CAPITULO 4

CONCLUSIONES

- La mayoría de las modelos de propagación fueron creados y probados en áreas urbanas que cuentan con características diferentes al Ecuador, por ser un país montañoso y con varios

desniveles el desvanecimiento por shadowing está más presente en nuestras comunicaciones móviles y dificulta una buena cobertura en todas las áreas.

- Existen varios tipos de software que se pueden utilizar para la medición de la potencia de recepción, pero la opción más viable son las que tengan un mapa donde se pueda geolocalizar la antena o las antenas a las que se encuentre conectado el receptor móvil, se puede utilizar Netmonitor que es el software utilizado en este proyecto o Network Cell Info & Wifi, ambas son gratuitas con opción a paga.
- Al momento de realizar las mediciones se puede notar como Otecel a pesar de ser la segunda operadora con mayor cantidad de RB distribuidas a lo largo del país, solo utiliza una RB para cubrir la parte central del valle de Tumbaco, esto pudo haber funcionado en el pasado ya que se consideraba un área rural, pero con el aumento de población el crecimiento de las edificaciones era inminente y ahora existe mayor pérdida en la potencia de recepción, esto se puede comprobar en la tabla 9 donde se comparan el error de cada modelo de propagación.
- El modelo de propagación que más se ajusta a las condiciones actuales del valle de Tumbaco es Okumura-Hata ya que sin importar la operadora es el que cuenta con el menor promedio de error, 13.6376 dB para Conecel, 44.0993 dB para Otecel y 23.1701 dB para CNT, mientras que los otros modelos de propagación presentan mayor promedio de error, en el caso del modelo COST231-Hata se obtuvo para Conecel 27.8746 dB, Otecel 58,3364 dB y CNT 23.1701 dB, por último el modelo Walfisch – Ikegami obtuvo para Conecel 23.0272 dB, Otecel 54.8470 dB y CNT 33.8026 dB, esto debido a que las características con las que trabaja el modelo Okumura-Hata se ajusta de mejor manera a las características de Tumbaco, ya que al ser un área de 65.5 Km^2 que no es tan amplia como las parroquias aledañas que son Pifo con un área de 254.24 Km^2 y Yaruqui con 71.95 Km^2 el parámetro de la distancia se adapta de mejor manera.

RECOMENDACIONES

- Para tener información más detallada de la señal que recibe el móvil se puede utilizar diferentes aplicaciones móviles para complementar a Netmonitor, algunas de estas aplicaciones podrían ser, Signal Strength que indica de forma más precisa la frecuencia, Network Cell info Lite que brinda una interfaz más amigable y fácil de entender, Cobertura muestra una marca térmica por todo el recorrido dependiendo la señal recibida y Opensignal cuenta con una base de datos de la cobertura en diferentes áreas.

- Se puede realizar una comparación de modelos de propagación, pero enfocado en las redes LTE con el estándar TDD.
- Se puede complementar este proyecto con un análisis del parámetro RSRQ y así tener en cuenta la calidad de la señal dependiendo la celda en la que se encuentre conectado el móvil.
- Para obtener mejores resultados la toma de muestras se debe realizar en un área más extensa y así poder obtener un mejor análisis de cobertura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. A. Ponce Castillo, J. S. Ledesma Buele, R. Puchaicela Cuenca, and K. J. Miraba Cajamarca, “Estudio comparativo de modelos de propagación con el análisis de la intensidad de la señal LTE de las estaciones base con el área de cobertura en Riobamba -Ecuador,” *ConcienciaDigital*, vol. 5, no. 3, pp. 273–296, Sep. 2022, doi: 10.33262/concienciadigital.v5i3.2323.
- [2] A. Flores Nuñez, H. Moreno, J. Ribadeneira, and D. Moreno Avilés, “Análisis comparativo de modelos de propagación en la telefonía móvil en la banda de 1900 MHz (LTE) a través de mediciones de campo eléctrico en la ciudad de Ambato,” *MASKAY*, vol. 13, no. 2, pp. 1–8, Apr. 2023, doi: 10.24133/maskay.v13i2.2899.
- [3] A. Francisco Moreta VICEPRESIDENTE VOCALES Franklin Rojas *et al.*, “PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO DE TUMBACO Dra. Lorena Brito PRESIDENTA,” 2020. Accessed: May 23, 2023. [Online]. Available: <https://tumbaco.gob.ec/wp-content/uploads/2021/07/PDOTTUMBACO2020nov.pdf>
- [4] Jorge Alessandro Gómez Vásquez Juan Ricardo Zorro López, “ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE 5 MODELOS DE PROPAGACIÓN DE LA RED 4G,” 2019. Accessed: Oct. 21, 2023. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12495/10265>
- [5] C. Muncha and D. María, “Análisis del desempeño de modelos de propagación utilizados en 4g,” 2021. Accessed: Oct. 21, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/23986>

- [6] Torres Vanegas Henry Anselmo, “METODOLOGÍAS DE DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE REDES 4G-LTE,” 2022. Accessed: May 24, 2023. [Online]. Available: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/27296/1/Methodolog%C3%ADas%20de%20dise%C3%B1o%20y%20evaluaci%C3%B3n%20del%20desempe%C3%B1o%20de%20redes%204G%20%20LTE.pdf>
- [7] Palacios Efraín, “SISTEMAS DE COMUNICACIONES MOVILES.” Accessed: Oct. 21, 2023. [Online]. Available: https://www.academia.edu/6898581/SISTEMAS_DE_COMUNICACIONES_MOVILES_INDICE_Introducci%C3%B3n_a_los_Sistemas_de_Comunicaciones_M%C3%B3viles
- [8] S. Molina and P. Zambrano, “Comparative Study of Propagation Models with LTE Technology in Urban and Suburban Areas of Riobamba City,” in *2022 IEEE 9th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, MAPE 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 403–407. doi: 10.1109/MAPE53743.2022.9935177.
- [9] J. I. Wilfrido Anchundia-Morales, J. I. Carlos Anchundia-Morales, and B. Fernando Chere-Quiñonez III, “La tecnología 5G en el Ecuador. Un análisis desde los requerimientos 5G,” vol. 5, pp. 805–822, 2020, doi: 10.23857/pc.v5i2.1313.
- [10] J. D. Vega Sánchez, L. Urquiza-Aguilar, and M. C. Paredes Paredes, “Modelos de canal de desvanecimiento para comunicaciones Millimeter-Wave,” *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, vol. 9, no. 17, pp. 17–25, Jan. 2021, doi: 10.36825/riti.09.17.003.
- [11] “2.2 Modelo de dos Rayos.”
- [12] “Wireless Communications Principles And Practice 2nd Edition by Rappaport (3)”.
- [13] ARCOTEL, “BoletinEstadistico-May2020-SMA-CoberturaInfraestructura,” 2020, Accessed: Oct. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/BoletinEstadistico-May2020-SMA-CoberturaInfraestructura.pdf>
- [14] D. DE Santiago Guayaquil Facultad De Educación Técnica Para El Desarrollo, “UNIVERSIDAD CATÓLICA.”
- [15] Montoya Dolly, “Esta es la lista de países de América Latina que están liderando la carrera por el 5G,” 2023, Accessed: Oct. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.larepublica.co/globoeconomia/paises-de-america-latina-en-los-que-opera-la-red->

