ESTUDIO ESTADÍSTICO CON BASE EN FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA LAS COMPONENTES RSRP, RSRQ Y RSSI DE LA TECNOLOGÍA 4G EN ESTACIONES BASE DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Autores
Daniel Felipe Orjuela Flórez
Hans Sneider Montañez Rodríguez

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Telecomunicaciones

Bogotá D.C. Abril, 2023

ESTUDIO ESTADÍSTICO CON BASE EN FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA LAS COMPONENTES RSRP, RSRQ Y RSSI DE LA TECNOLOGÍA 4G EN ESTACIONES BASE DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Autores
Daniel Felipe Orjuela Flórez 20191373031
Hans Sneider Montañez Rodríguez 20191373007

Modalidad
Monografía

Presentado para optar al título de: Ingeniero en Telecomunicaciones

Director
Luis Fernando Pedraza Martinez

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Telecomunicaciones

Bogotá D.C. Abril, 2023

Dedicatoria

A nuestras familias, quienes siempre nos han apoyado y brindado su amor incondicional. A nuestros padres, por ser nuestros primeros maestros y guiarnos en cada paso de nuestro camino. Y a nuestros docentes, por ser una fuente inagotable de sabiduría y motivación. Este proyecto no habría sido posible sin su valioso apoyo y confianza en nosotros. Gracias por ser una parte fundamental de nuestra vida y nuestro éxito.

Índice

Dedicatoria 3
Índice ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Índice de Figuras 6
Índice de Tablas 8
Glosario 9
Lista de Abreviaturas y Siglas 10
Resumen 11
1. Introducción 12
2. Planteamiento del problema 13
3. Justificación 14
4. Objetivos 15
4.1 Objetivo General 15
4.2 Objetivos específicos 15
5. Marco de referencia 16
5.1 Antecedentes 16
5.2 Marco teórico 17
5.2.1 Estaciones Base 17
5.2.2 Sistema de Celdas 18
5.2.3 Bandas de Frecuencia 18
5.2.4 Potencia de Señal Recibida de Referencia y Calidad de la Señal Recibida de Referencia. 21
5.2.5 Indicador de la Intensidad de la Señal Recibida. 23
5.2.6 Función de Densidad de Probabilidad 23
5.2.7 NetMonster 25
5.2.8 Análisis de Varianza 25
5.2.9 Distancia Geográfica 26
5.3 Marco Legal 27
6. Metodología 28
6.1 Medición de los Parámetros 28
6.1.1 Ruta 1 29
6.1.2 Ruta 2 30
6.1.3 Ruta 3 31
6.1.4 Ruta 4 32
6.1.5 Ruta 5 33
6.2 Registro de Datos 34
6.3 Análisis de la Variación de Potencia en el Muestreo 36
6.4 Evaluación los Parámetros en Relación con la Distancia a la Estación Base 38
6.5 Gráficas de Funciones de Densidad de Probabilidad 41
6.5.1 Ruta 1 42
6.5.2 Ruta 2 43
6.5.3 Ruta 3 45
6.5.4 Ruta 4 46
6.5.5 Ruta 5 48

6.6 Método Análisis de Varianza 49
7. Resultados 52
7.1 Análisis Estadístico de las Funciones de Densidad de Probabilidad 52
7.2 Análisis de Varianza 57
8. Conclusiones y Recomendaciones 60
9. Referencias 62
Anexos 66

Índice de Figuras

Figura 1 Estación base de telefonía celular. (Huidobro Moya, 2012) 17
Figura 2 Sistema de celdas de telecomunicaciones. (Garg, 2002). 18
Figura 3 Función de densidad normal. (Robinson, E. A. (2013)) 24
Figura 4 Vista Google Earth Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia 29
Figura 5 Elevación de la Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia 29
Figura 6 Vista Google Earth Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia 30
Figura 7 Elevación de la Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia 30
Figura 8 Vista Google Earth Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia 31
Figura 9 Elevación de la Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia 31
Figura 10 Vista Google Earth Ruta 4. Fuente: Elaboración Propia 32
Figura 11 Elevación de la Ruta 4. Fuente: Elaboración Propia 32
Figura 12 Vista Google Earth Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia 33
Figura 13 Elevación de la Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia 33
Figura 14 Registro de datos 1 Obtenido mediante la App NetMonster. Fuente: Elaboración Propia 34
Figura 15 Registro de datos 2 Obtenido mediante la App NetMonster. Fuente: Elaboración Propia 34
Figura 16 Registro de datos 3 Obtenido mediante la App NetMonster. Fuente: Elaboración Propia 34
Figura 17 Registro de datos 4 Obtenido mediante la App NetMonster. Fuente: Elaboración Propia 35
Figura 18 Medidas de potencias RSRP, RSSI y RSRQ de la ruta 1. Fuente: Elaboración Propia 36
Figura 19 Medidas de potencias RSRP, RSSI y RSRQ de la ruta 2. Fuente: Elaboración Propia 36
Figura 20 Medidas de potencias RSRP, RSSI y RSRQ de la ruta 3. Fuente: Elaboración Propia 37
Figura 21 Medidas de potencias RSRP, RSSI y RSRQ de la ruta 4. Fuente: Elaboración Propia 37
Figura 22 Medidas de potencias RSRP, RSSI y RSRQ de la ruta 5. Fuente: Elaboración Propia 38
Figura 23 Potencia Respecto a la Distancia Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia..... 39
Figura 24 Potencia Respecto a la Distancia Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia..... 39
Figura 25 Potencia Respecto a la Distancia Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia..... 40
Figura 26 Potencia Respecto a la Distancia Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia..... 40
Figura 27 Potencia Respecto a la Distancia Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia..... 41
Figura 28 Distribución de probabilidad para RSSI de la Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia... 42
Figura 29 Distribución de probabilidad para RSRQ de la Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia. 42
Figura 30 Distribución de probabilidad para RSRP de la Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia . 43
Figura 31 Distribución de probabilidad para RSSI de la Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia... 43
Figura 32 Distribución de probabilidad para RSRQ de la Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia. 44
Figura 33 Distribución de probabilidad para RSRP de la Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia . 44
Figura 34 Distribución de probabilidad para RSSI de la Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia... 45
Figura 35 Distribución de probabilidad para RSRQ de la Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia. 45

Figura 36 Distribución de probabilidad para RSRP de la Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia . 46
Figura 37 Distribución de probabilidad para RSSI de la Ruta 4. Fuente: Elaboración Propia... 46
Figura 38 Distribución de probabilidad para RSRQ de la Ruta 4. Fuente: Elaboración Propia. 47
Figura 39 Distribución de probabilidad para RSRP de la Ruta 4. Fuente: Elaboración Propia . 47
Figura 40 Distribución de probabilidad para RSSI de la Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia... 48
Figura 41 Distribución de probabilidad para RSRQ de la Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia. 48
Figura 42 Distribución de probabilidad para RSRP de la Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia . 49
Figura 43 Porcentaje del área bajo la curva distribución normal. Fuente: Elaboración Propia.. 52

Índice de Tablas

Tabla 1 Rangos de bandas de Frecuencia. (Pascual García, et al. 2010). 19
Tabla 2 Frecuencias y bandas usadas en Colombia. (Pascual García, et al. 2010). 19
Tabla 3 Operadores en Colombia. (Fernández López y González López, 2016). 20
Tabla 4 Niveles de RSRP. (Teltonika, s.f.) 21
Tabla 5 Niveles de RSRQ. (Teltonika, s.f.). 22
Tabla 6 Rangos RSRQ. (Teltonika, s.f.) 23
Tabla 7 Bandas de Frecuencia Xiaomi modelo m2101k7bl (Redmi Note 10s). (Xiaomi.co, s.f.) 28
Tabla 8 Matriz de Análisis Descriptivo Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia. 35
Tabla 9 Comparaciones múltiples del test de Tukey. (Cajal, 2022). 50
Tabla 10 Análisis de Varianza de un factor 1. Fuente: Elaboración Propia 50
Tabla 11 Tabla comparativa de distribución más significativa de funciones respecto a valores reales. Fuente: Elaboración Propia 51
Tabla 12 Probabilidad de nivel de señal Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia 53
Tabla 13 Probabilidad de nivel de señal Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia 53
Tabla 14 Probabilidad de nivel de señal Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia 54
Tabla 15 Probabilidad de nivel de señal Ruta 4. Fuente: Elaboración Propia 54
Tabla 16 Probabilidad de nivel de señal Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia 55
Tabla 17 Error Absoluto de probabilidad Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia 56
Tabla 18 Tabla de error promedio para la componente RSSI. Fuente: Elaboración Propia 56
Tabla 19 Tabla de error promedio para la componente RSRP. Fuente: Elaboración Propia 56
Tabla 20 Tabla de error promedio para la componente RSRQ. Fuente: Elaboración Propia 57
Tabla 21 Análisis ANOVA, potencia RSSI, para cada una de las BTS . Fuente: Elaboración propia 58
Tabla 22 Análisis ANOVA, potencia RSRP, para cada una de las BTS. Fuente: Elaboración propia. 58
Tabla 23 Análisis ANOVA, potencia RSRQ, para cada una de las BTS. Fuente: Elaboración propia 58

Glosario

Megahercio	Unidad de medida de frecuencia que equivale a un millón de ciclos por segundo.
Modulación	Proceso de modificar una señal de alta frecuencia llamada portadora para transportar información de una señal de baja frecuencia llamada moduladora.
Transceptora	Dispositivo que combina un transmisor y un receptor en un solo equipo para permitir la comunicación bidireccional.
Divergencia	Fenómeno por el cual un haz de luz o una onda se aleja y se expande a medida que se propaga.
Cuadratura	Técnica de modulación en la cual la señal moduladora se divide en dos componentes ortogonales que se usan para modular la portadora en fase y en cuadratura
Portadora	Señal de alta frecuencia que se modifica con la información de una señal de baja frecuencia para transmitirla a través de un medio de comunicación.
Intensidad	Magnitud física que representa la cantidad de energía que se transmite por unidad de área y tiempo de una onda, medida en vatios por metro cuadrado.

Lista de Abreviaturas y Siglas

Sigla/Abreviatura

2G	Segunda generación móvil.
3G	Tercera generación móvil.
3GPP	Proyecto Asociación de Tercera Generación.
4G	Cuarta generación móvil.
5G	Quinta generación móvil.
BPSK	Modulación por desplazamiento diferencial de fase.
BTS	Estación Base Transceptora.
E-UTRA	Red de Acceso de Radio Terrestre UMTS Evolucionada.
FDD	División Duplex por Frecuencia.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global.
HSDPA	Acceso de Paquetes de Enlace Descendente de Alta Velocidad.
HSPA	Acceso de Paquetes de Alta Velocidad.
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IF	Frecuencia Intermedia.
LTE	Evolución de Largo Plazo.
MIMO	Entradas Múltiples Salidas Múltiples.
MHz	Megahercio.
Mbit/s	Megabits por Segundo.
OFDM	Acceso de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.
PRB	Bloque de Recursos Físicos.
QAM	Modulación de Amplitud en Cuadratura.
QoS	Calidad de Servicio.
QPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
RSRP	Potencia de la Señal Recibida de Referencia.
RSRQ	Calidad de la Señal Recibida de Referencia.
RSSI	Indicador de la Intensidad de la Señal Recibida.
SC-FDMA	Acceso de Multiplexación por División de Frecuencia de Portadora Única.
TDD	División de Duplex por Tiempo.
UMTS	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles

Resumen

Una óptica para la implementación de redes móviles 4G conlleva conocer modelos de propagación de ondas electromagnéticas, los cuales servirán para llevar a cabo una correcta planificación y optimización de las redes. También, permite realizar estudios de viabilidad al obtener una perspectiva de las pérdidas por trayectoria en puntos específicos. En consecuencia, la medición de las señales propagadas por la antenas es de gran importancia para lograr predecir el comportamiento del canal y la calidad de este dependiendo de la posición del dispositivo con respecto a la estación base (BTS) (García Rueda, 2016).

Así pues, es fundamental el conocimiento del comportamiento de la señal en el área de cobertura de una estación base (BTS) para asegurar correctos niveles de señal en los dispositivos, optimizando así su conexión a la red. Actualmente se cuenta con modelos de propagación que evalúan los niveles de potencia en el área de influencia de la BTS (Pedraza, et al., 2009). Sin embargo, estos datos, en su mayoría, no están abiertos y disponibles para el desarrollo de nuevos modelos de propagación. En este sentido, se identifica la necesidad de obtener los datos reales que permitan el desarrollo de nuevos métodos de transmisión de la señal según la capacidad y el tipo de terreno, esto para asegurar un mayor nivel de cobertura y una alta calidad en el servicio (QoS).

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este proyecto es analizar el comportamiento de los parámetros RSPR (potencia de señal recibida de referencia), RSRQ (Calidad recibida de la señal de referencia) y RSSI (Indicador de intensidad de señal recibida) en la tecnología 4G en torno a las estaciones bases ubicadas en la ciudad de Bogotá. Para ello se definió un proceso que parte de la obtención de datos por medio de un software especializado en el registro de señales 4G instalado en un dispositivo móvil, Adicionalmente, se obtienen las coordenadas mediante un GPS para dispositivos móviles; estos datos se analizan con base en las componentes RSRQ, RSRP y RSSI de la tecnología 4G. Luego, se procesan dichos datos mediante softwares como Excel y Matlab para su posterior análisis. La modalidad de trabajo será una monografía, con salidas de campos para la recolección de datos para su posterior análisis.

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que las gráficas de densidad de probabilidad son una herramienta útil para analizar el comportamiento probabilístico de una señal 4G y de una red en general. También, se logró obtener información valiosa sobre la distribución de probabilidad de los valores de la señal, lo que ayuda a detectar patrones o tendencias en los datos. Además, se encontró que la Función de Densidad de Kernel es útil para evaluar el comportamiento de una red en casos individuales, mientras que la Gráfica de Densidad Normal es más adecuada para su uso generalizado con diferentes conjuntos de datos. Así pues, ambas herramientas proporcionan una comprensión clara y fácil de interpretar el comportamiento de la red.

1. Introducción

La tecnología 4G fue diseñada para permitir la transmisión de datos a alta velocidad en los teléfonos móviles en respuesta a la creciente demanda de una mejor calidad de servicio y menor latencia. En Colombia, la implementación de esta tecnología comenzó en 2012 y para el final de 2018, se instalaron 40.482 antenas, lo que representó aproximadamente un tercio del número de antenas 3G disponibles ese mismo año (131.619, según el CRC (2019)). Esto se debe a que la topografía colombiana presenta numerosos desafíos para el despliegue de antenas, lo que limita la capacidad de mejorar la cobertura del servicio.

Es esencial comprender cómo se comporta la señal en la zona de alcance de las estaciones base (BTS) para garantizar que los dispositivos tengan niveles de potencia de señal adecuados, lo que optimiza su conexión a la red. En la actualidad, existen modelos de propagación que evalúan los niveles de potencia en el área de influencia de la BTS (Pedraza, et al., 2009).

Este proyecto tiene como objetivo realizar un análisis estadístico tomando como referencia las funciones de densidad de probabilidad de los parámetros RSPR, RSRQ y RSSI en la tecnología 4G a partir de cinco estaciones base ubicadas en la ciudad de Bogotá. Para ello en esta monografía se encontrará; en primer lugar, una revisión del estado del arte sobre el tema, con el fin de identificar cuáles son los avances que se han realizado al respecto y poder trabajar sobre estas investigaciones. De igual manera, en la sección Marco referencial, se encontrará una revisión conceptual y legal de los conceptos y limitaciones que es fundamental tener en cuenta a la hora de realizar una propuesta concreta posteriormente.

En la sección de Metodología se podrá encontrar la delimitación del proceso seguido para poder obtener y analizar los datos. Primero, se encontrará la delimitación de las cinco rutas alrededor de las cuales se realizó el análisis de las estaciones base; además, de los gráficos en los cuales se puede ver la variabilidad en su relieve para encontrar sus diferencias de elevación. Luego, se procederá a registrar los datos de los parámetros RSPR, RSRQ y RSSI, que posteriormente serán analizados estadísticamente a través de funciones de densidad de probabilidad. Finalmente, se encontrará en el análisis de resultados una comparación de los resultados teóricos con los resultados prácticos obtenidos a partir de la recolección de información en la sección anterior, los cuales permitirán establecer algunas conclusiones en la última sección de este documento.

2. Planteamiento del problema

En la era de la tecnología celular el estándar 4G (Long Term Evolution) se convirtió en un elemento clave, dado que sus características lo convierten en la solución para los problemas de capacidad y conectividad que se presentan en la actualidad (Vargas Patiño y Cardona Gutiérrez, 2016). Es fundamental el conocimiento del comportamiento de la señal en el área de cobertura de las estaciones base (BTS) para asegurar correctos niveles de potencia de la señal en los dispositivos, optimizando así su conexión a la red. Actualmente se cuenta con modelos de propagación que evalúan los niveles de potencia en el área de influencia de la BTS (Pedraza, et al., 2009). Sin embargo, estos datos en su mayoría no están abiertos y disponibles para el desarrollo de nuevos canales o modelos de propagación. En este sentido, se identifica la necesidad de obtener los datos que permitan el desarrollo de nuevos métodos de transmisión de la señal que aseguren que la potencia emitida por las antenas sea enviada de la manera más eficiente. Todo esto, con el fin de aumentar la cobertura entregada por las estaciones base optimizando los recursos y entregando un servicio óptimo por parte de las BTS.

3. Justificación

La tecnología 4G es un estándar creado para la transmisión de datos de alta velocidad en telefonía celular. Esta nace por la demanda emergente de alta velocidad de transmisión de datos, la disminución de latencia y el aumento de la calidad del servicio (QoS). Su implementación en Colombia inició en el año 2012 y para finales del 2018 ya se contaba con 40.482 antenas instaladas; lo cual representaba cerca de un tercio de las antenas de 3G que, en ese año, llegaban a 131.619 (CRC, 2019). Lo anterior debido a que la geografía colombiana genera muchos obstáculos en el despliegue de las antenas necesarias para aumentar el alcance de este servicio. El cálculo de estas coberturas se realiza mediante modelos matemáticos tales como el Okumura-Hata o Cost 231, los cuales toman como referencia ciudades o zonas urbanas frecuentemente ubicadas en países más desarrollados (Alonso Quintana, et al., 2013); estos, al ser métodos tan generales, pueden llegar a estar alejados de la realidad al momento de su implementación en ciudades con otro tipo de distribución. La falta de estudios y recolección de datos en las zonas de cobertura causa que su eficiencia espectral no sea usada en su totalidad, por lo cual, se hace necesario realizar estudios o modelos de cobertura enfocados a nivel local que permitan predecir mejor el comportamiento de las señales y así mejorar su implementación tanto en zonas urbanas como rurales.

Para la correcta implementación de redes móviles 4G, es vital conocer los modelos de propagación de las señales para así llevar a cabo una correcta planificación y optimización de las redes. Por consiguiente, los estudios de los modelos de propagación son de gran importancia para lograr predecir el comportamiento del canal dependiendo de la zona y el tipo de edificaciones u obstáculos naturales con los cuales se tendrán que enfrentar las señales. Se genera, entonces, la necesidad de realizar un análisis estadístico que ayude a interpretar el comportamiento de las señales y determinar el área de cobertura en el cual están trabajando las estaciones base. De esta manera, se puede determinar si el servicio prestado cubre toda el área esperada y si la potencia entregada en toda el área de afectación cumple con un estándar mínimo en la calidad de servicio. Con ello se espera que los datos aportados en este estudio faciliten el avance e investigación para el futuro desarrollo de modelos que optimicen las coberturas de las BTS en la ciudad de Bogotá; mejorando así la penetración de la tecnología y el acceso a la misma.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Analizar estadísticamente con base en funciones de densidad de probabilidad los parámetros RSPR, RSRQ y RSSI en la tecnología 4G en torno a cinco estaciones base ubicadas en Bogotá.

4.2 Objetivos específicos

- Realizar la medición de los parámetros RSRP, RSRQ y RSSI alrededor de cinco estaciones base.
- Analizar estadísticamente con funciones de densidad de probabilidad los datos obtenidos de los componentes RSRP, RSRQ y RSSI en la tecnología 4G.
- Evaluar los niveles de los parámetros RSRP, RSRQ y RSSI en relación con la distancia entre el móvil y la BTS.

5. Marco de referencia

5.1 Antecedentes

Los estudios de cobertura y el análisis de los servicios prestados por los operadores son de gran importancia para monitorear el alcance y la penetración de las tecnologías; debido a esto, es posible observar estudios que tienen como objetivo determinar la cobertura y capacidad de redes 2G, 3G y 4G. Un ejemplo de esto fue un estudio (Constain Prado, 2018), realizado en la ciudad de Armenia, donde después del análisis se pudo determinar que hay ciertos factores que influyen en el desempeño de las comunicaciones dentro de una red celular como son: la topología, la potencia de los transmisores, la cantidad de tráfico (número de llamadas) que soportan las células, entre otros. Así pues; a medida que aumentan factores como la distancia entre las estaciones base y el móvil, o el número de usuarios en la zona; la señal recibida por los dispositivos móviles se deteriora. En el estudio se llegó a la conclusión de que un mayor número de BTS mejoran la capacidad y cobertura en redes 2G; además, para la tecnología 3G se tendrá una cantidad alta de RNC.

Otro tipo de estudios son aquellos que buscan comparar el servicio entregado por diferentes operadores. Un ejemplo de esto fue el estudio realizado por Julián Mauricio Garzón Gil (2015) con el fin de analizar la cobertura en la señal 4G(LTE) de los tres principales operadores de la zona en la localidad de Chapinero, en la ciudad de Bogotá, La finalidad del proyecto fue medir las diferentes variables de las señales LTE como lo son la potencia y la calidad del servicio. Es importante recalcar que los datos obtenidos corresponden a la señal entregada por todas las BTS disponibles de cada operador en la zona. El análisis se centró en la comparación de los niveles de señales ofrecido por los operadores en el total del recorrido con el fin de identificar el mejor servicio y las diferencias que tenían con respecto a su competencia. Adicional a estas comparaciones, se puede observar otro tipo de comportamientos en las señales. Por ejemplo, cómo es posible observar en un estudio de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Fonseca Puentes y Marín Arias, 2018), donde se analizó las potencias en diferentes puntos de la universidad para comprobar la radiación generada por los diferentes operadores; para ello se realizaron intervalos de muestreo de 60 segundos. Los datos obtenidos a partir de las mediciones en los puntos fueron analizados según los métodos de propagación Okumura-Hata para hallar los niveles de potencia teóricos emitidos por la antena y comparar los resultados prácticos. Las conclusiones de este estudio comprobaron que estos niveles no superan el nivel permitido por la regulación vigente al momento de realizar el proyecto.

Estudios recientes, también, han estudiado puntualmente la cobertura de una estación base (BTS) fija, esto con la finalidad de entender el comportamiento de la señal y el desvanecimiento causado por los diferentes obstáculos. Un estudio que permite ver esto es el realizado por Simpson y Sun (2018), donde se recolectaron datos en el campus de una universidad, que permitieran realizar una caracterización de la señal emitida por la antena ubicada donde se ejecutó dicha investigación y, de esta manera, mejorar los métodos de análisis para elevar los niveles de cobertura y la calidad de la señal. Para esto se evaluaron las componentes RSRP, RSRQ y RSSNR respecto a la distancia y el perfil de elevación de la BTS, y se realizó el análisis estadístico del comportamiento de las señales en diferentes puntos alrededor de la BTS.

De igual forma, existen diferentes tipos de herramientas de apoyo para los estudios de cobertura radioeléctrica de la tecnología LTE. Así se puede encontrar estudios del alcance de cobertura tanto teórico como práctico mediante el uso de un hardware que facilita la medición. La cobertura teórica se ha predicho mediante softwares comerciales (Xirio Online); de libre distribución (Radio Mobile); y a través de una *toolbox* de Matlab, específicamente desarrollada para esta tarea. Un ejemplo de lo anterior, son las medidas de potencia recibida en la ciudad de Úbeda, para ver la extensión de la zona de cobertura en la ciudad (Henares-Villar, 2015). Además, la comparación de los resultados teóricos con los obtenidos por medición permite determinar qué modelos y métodos de análisis son más exactos y qué software resulta más útil para una planificación posterior.

También, se ha abordado la creación de redes de comunicaciones móviles celulares a través de la herramienta Xirio la cual fue desarrollada por Aptica cuyo propósito es utilizar esta herramienta para la planeación de una red móvil celular, incorporando mejoras a través de esta para así analizar las características que se pueden implementar y evidenciar por medio del simulador, además de establecer las ventajas frente a otro tipo de herramientas de planificación de redes. Así pues, en estudios como el realizado por Rodríguez Melo, et al. (2018) se puede concluir que esta herramienta permite realizar planeación a nivel estructural por área, pero no a nivel de capacidad pues esta no lo permite. Además de la simulación, se pudo encontrar que a frecuencias más bajas se obtiene una mayor cobertura, así pues, usando la banda 1900 se puede evidenciar que las áreas de cobertura son menores.

5.2 Marco teórico

5.2.1 Estaciones Base

La tecnología móvil actual se basa en una arquitectura de celdas la cuales se distribuyen de manera equitativa sobre una zona geográfica, cada celda cuenta con una estación base (BTS) la cual está equipada con equipos emisores y receptores; los cuales, según los servicios prestados, pueden contener antenas para servicios 2G, 3G o 4G con las cuales permite la transmisión de datos con los terminales móviles que estén en su zona de cobertura. Además, cuentan con conexión con las centrales telefónicas (BSC) para la interconexión de las celdas y permitir la comunicación de usuarios con equipos ubicados en otras BTS. De igual forma, permite el *handover* al cambiar de zona de cobertura de una celda a otra adyacente (Huidobro Moya y Conesa Pastor, 2006), tal como se observa en la Figura 1.

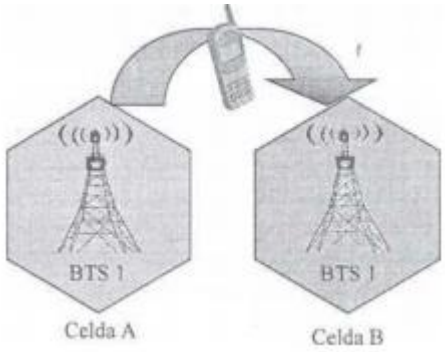


Figura 1 Estación base de telefonía celular. (Huidobro Moya, 2012)

5.2.2 Sistema de Celdas

Un sistema de celdas es un conjunto de BTS organizadas de tal manera que se cubra un área determinada. La ventaja de usar celdas hexagonales es que la distancia con respecto a sus vecinas será la misma en todas las direcciones, lo cual permite cubrir toda el área sin dejar espacios sin cobertura por una o más BTS. Otra de las ventajas es que permite realizar un reúso de frecuencias en las celdas, esto gracias a que el alcance de las señales a altas frecuencias es limitado. En consecuencia, varias BTS en una cobertura pueden usar la misma frecuencia con la condición de que se encuentren a una distancia prudente de las celdas con las que comparte estas frecuencias para evitar interferencia en su señal (Huidobro Moya, 2004). Este tipo de sistema de celdas se puede apreciar en la Figura 2.

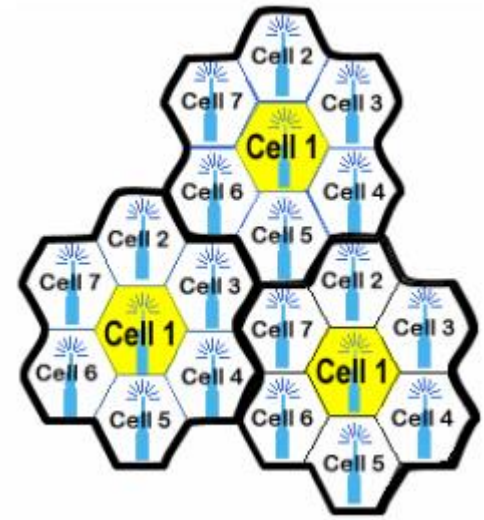


Figura 2 Sistema de celdas de telecomunicaciones. (Garg, 2002).

Debido a esto, el uso de sistemas celulares ha permitido que se aumente el número de usuarios por celda, permitiendo un uso más eficiente del espectro radioeléctrico donde con pocas bandas puede cubrirse una gran área de cobertura y facilitar el movimiento libre del usuario a través de las celdas de cobertura. Permitiendo así obtener siempre el mejor servicio con relación a las señales que le llegan de diferentes puntos (Fernández López y González López, 2002).

5.2.3 Bandas de Frecuencia

Las bandas de frecuencia son intervalos de frecuencias del espectro electromagnético asignados a diferentes usos dentro de las radiocomunicaciones. Su uso está regulado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones y puede variar según el lugar. El espacio asignado a las diferentes bandas abarca el espectro de radiofrecuencia y está dividido en sectores (Pascual García, et al. 2010). Esto se puede ver con más claridad en la Tabla 1.

Banda	Denominación	Frec. Mínima	Frec. Máxima	λ máxima	λ máxima 2
ELF	Extremely Low Frequency	-	3KHZ	-	100 km
VLF	Very Low Frequency	3KHZ	30 KHZ	100 km	10 km
LF	Low Frequency	30 KHZ	300 KHZ	10 km	1 km
MF	Medium Frequency	300 KHZ	3 MHZ	1 km	100 m
HF	High Frequency	3 MHZ	30 MHZ	100 m	10 m
VHF	Very High Frequency	30 MHZ	300 MHZ	10 m	1 m
UHF	Ultra High Frequency	300 MHZ	3 GHZ	1 m	10 cm
SHF	Super High Frequency	3 GHZ	30 GHZ	10 cm	1 cm
EHF	Extremely Low Frequency	30 GHZ	300 GHZ	1 cm	1 mm

Tabla 1 Rangos de bandas de Frecuencia. (Pascual García, et al. 2010).

Con el fin de alcanzar una óptima administración del Espectro Radioeléctrico, este bien natural se divide comúnmente en rangos de frecuencia menores conocidos como bandas de frecuencia. De igual manera, cada país al ejercer su derecho soberano de administrar su propio espectro radioeléctrico puede identificar grupos de bandas de frecuencia con el fin de facilitar su explotación (León Juárez, 2013).

A continuación, en la Tabla 2, se puede consultar todas las frecuencias de cobertura 2G, 3G, 4G/LTE y 5G usadas en Colombia, así como su uso por cada operador. Al igual que las estaciones de radio y televisión, las redes móviles operan en diferentes frecuencias de ancho de banda. Estos se miden en bandas de megahercios, como 850MHz o 2100MHz (Iglesias Quiñones, 2016).

Cobertura	Bandas y Frecuencias
2G	**B2** (1900), **B5** (850)
3G	**B2** (1900), **B5** (850)
4G	**B2** (1900), **B4** (1700/2100), **B7** (2600)
5G	No

Tabla 2 Frecuencias y bandas usadas en Colombia. (Pascual García, et al. 2010).

También, en la Tabla 3, se enumeran las frecuencias y bandas con las que operan las redes de operadores más populares de Colombia

Operador	2G	3G	4G	5G
Claro	**B2** (1900), **B5** (850)	**B2** (1900), **B5** (850)	**B7** (2600)	No
Movistar	**B2** (1900), **B5** (850)	**B5** (850)	**B2** (1900), **B4** (1700/2100	No
TigoUNE	**B2** (1900), **B5** (850)	**B2** (1900)	**B4** (1700/2100)	No
Avantel	-	**B5** (850)	**B4** (1700/2100)	No
ETB	**B2** (1900), **B5** (850)	**B2** (1900)	**B4** (1700/2100)	No

Tabla 3 Operadores en Colombia. (Fernández López y González López, 2016).

5.2.3.1 Características Técnicas de la Señal Celular de 4° Generacion

Desde sus comienzos en 2004, el trabajo sobre LTE 4G se centró en mejorar el acceso radio terrestre de UMTS (E-UTRA) y la optimización de la arquitectura 3GPP de acceso radio. En el enlace descendente se obtendrían velocidades de datos de usuario de 100 Mbit/s (de tres a cuatro veces superior a lo proporcionado por HSDPA en la Rel-6) y de 50 Mbit/s en el ascendente (de dos a tres veces las prestaciones de HSUPA). En 2007, la tecnología de acceso radio de LTE E-UTRA (Evolved o Enhanced UTRA) pasó de la etapa de estudio de viabilidad a la elaboración de las especificaciones técnicas necesarias. A finales de 2008, las especificaciones eran lo suficientemente estables para su aplicación comercial (Iglesias Quiñones, 2016).

Se seleccionó el método de acceso OFDM (Orthogonal Frequency División Multiplexing Access) para el enlace descendente y SC-FDMA (Single Carrier- Frequency División Multiplexing Access) para el enlace ascendente. En cuanto a esquemas de modulación, para el enlace descendente se han definido los esquemas de modulación BPSK, QPSK, 16 QAM y 64 QAM, mientras que para el enlace ascendente se tienen QPSK, 8 PSK y 16 QAM. E-UTRA utiliza una serie de anchos de banda de canal definido entre los 1,25 y 20 MHz (en contraste con uno fijo en UTRA de 5 MHz por canal). Los canales de difusión (broadcast) sólo pueden emplear QPSK[20].

Los principales requisitos y capacidades de la red LTE son los siguientes (Kazmeirczyk, 2020).

- Velocidad máxima de transmisión teórica en el enlace descendente (de la estación base al móvil) de hasta 326 Mbit/s usando un ancho de banda de 20 MHz y MIMO 4x4 y 173 Mbit/s con MIMO 2x2; u 86 y 58 Mbit/s con 1x2 64 QAM y 16 QAM respectivamente.
- Velocidad máxima de transmisión teórica en el enlace ascendente (del móvil a estación base) de 86,4 Mbit/s con ancho de banda de 20 MHz.
- Funcionamiento tanto en modo TDD (Time Dúplex División) como FDD (Frequency Dúplex División).
- Ancho de banda escalable desde 1,25 hasta 20 MHz, que abarca 1,25 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz.
- Aumento considerable de la eficiencia espectral (número de bits que pueden ser transmitidos por hercio), con un incremento respecto de HSPA de entre el 100% y el 200%.

- Reducción de la latencia, de hasta 10 milisegundos (ms), de ida y vuelta entre el equipo del usuario y la estación base, y a menos de 100 ms el tiempo de transición de los modos inactivo (idlé) a activo (connected). Estos modos se describirán más a profundidad en un apartado posterior.

5.2.4 Potencia de Señal Recibida de Referencia y Calidad de la Señal Recibida de Referencia.

Las señales de referencia de alimentación recibida (RSRP) y la calidad recibida de señal de referencia (RSRQ) son medidas clave del nivel de señal y la calidad para las redes LTE modernas. En las redes celulares, cuando un dispositivo móvil se mueve de una celda a otra, y realiza la selección/reelección y traspaso de celdas, tiene que medir la intensidad/calidad de la señal de las celdas vecinas. En el procedimiento de traspaso, la especificación LTE proporciona la flexibilidad de utilizar RSRP, RSRQ o ambos (Teltonika, s.f.).

5.2.4.1 Potencia de la Señal Recibida de Referencia

Es la potencia promedio de los elementos de recurso (RP) que llevan las señales de referencia específicas de la celda (RS) sobre todo el ancho de banda, así que el RSRP se mide solamente en los símbolos que llevan RS. Así pues, RSRP es la potencia media recibida de un único elemento de recurso RS. UE mide la potencia de varios elementos de recursos utilizados para transferir la señal de referencia, pero luego toma un promedio de ellos en lugar de sumarlos. También puede presentar un rango de informes -44...-140 dBm (Arimas, s.f.; CableFree, s.f.). Esto se puede ver más concretamente en la Tabla 4.

RSRP	Calidad de la Señal	Descripción
>=-80 dBm	Excelente	Señal fuerte con velocidades máximas de datos
-80 dBm a -90 dBm	Bien	Señal fuerte con buenas velocidades de datos
-90 dBm a -100 dBm	Justa	Se pueden alcanzar velocidades de datos fiables, pero es posible que se produzcan datos marginales
<=-100 dBm	Sin Señal	Desconexión

Tabla 4 Niveles de RSRP. (Teltonika, s.f.)

RSRP hace un mejor trabajo de medición de la potencia de la señal de un sector específico, excluyendo potencialmente el ruido y la interferencia de otros sectores. Los niveles RSRP para la señal utilizable varían típicamente de, aproximadamente, -75 dBm cerca de un sitio de celda LTE a -120 dBm en el borde de la cobertura LTE (Teltonika, s.f.).

5.2.4.2 Calidad de la Señal Recibida de Referencia.

Calidad recibida de la señal de referencia:
RSRQ es un tipo de medición C/I e indica la calidad de la señal de referencia recibida. La medición RSRQ proporciona información adicional cuando el RSRP no es suficiente para tomar una decisión confiable de traspaso o reelección de celda (Teltonika, s.f.).

RSRQ	Calidad de la Señal	Descripción
>=-10 dBm	Excelente	Señal fuerte con velocidades máximas de datos
-10 dBm a -15 dBm	Bien	Señal fuerte con buenas velocidades de datos
-15 dBm a -20 dBm	Justa	Se pueden alcanzar velocidades de datos fiables, pero es posible que se produzcan datos marginales
<=-20 dBm	Sin Señal	Desconexión

Tabla 5 Niveles de RSRQ. (Teltonika, s.f.).

Esto se puede expresar mejor en la fórmula 1 (Sauter, 2011):

$$\mathrm{RSRQ} = \frac{\mathrm{N}*\mathrm{RSRP}}{\mathrm{RSSI}} \quad (1)$$

Donde:
N es el número de bloques de recursos físicos (PRB) sobre los cuales se mide el RSSI, típicamente igual al ancho de banda del sistema.
RSSI es la medición de potencia de banda ancha, incluyendo potencia intracelular, interferencia y ruido.

El rango de potencia para RSRQ se varía desde -3 hasta -19.6 dB, lo cual es posible observar en la tabla 6.

Reported value	Measured quantity value	Unit
RSRQ_00	RSRQ <-19,6	dB
RSRQ_01	-19,5 <= RSRQ <-19	dB
RSRQ_02	-19,5 <= RSRQ <-18,5	dB
…	…	…
RSRQ_32	-4 <= RSRQ <-3,5	dB

RSRQ_33	-3,5 <= RSRQ <-3	dB
RSRQ_34	-3 <= RSRQ	dB

Tabla 6 Rangos RSRQ. (Teltonika, s.f.)

5.2.5 Indicador de la Intensidad de la Señal Recibida.

En telecomunicaciones, el indicador de intensidad de señal recibida (RSSI) es una medida de la potencia presente en una señal de radio recibida. RSSI suele ser invisible para un usuario de un dispositivo receptor. Sin embargo, debido a que la intensidad de la señal puede variar mucho y afectar a la funcionalidad en redes inalámbricas, los dispositivos IEEE 802.11 a menudo ponen la medición a disposición de los usuarios (Dahlman, et al., 2008).

RSSI se deriva a menudo en la etapa de frecuencia intermedia (IF) antes del amplificador IF. En los sistemas de FI cero, se deriva en la cadena de señal de banda base, antes del amplificador de banda base. La salida RSSI es a menudo un nivel analógico de DC. También puede ser muestreado por un convertidor interno de analógico a digital (ADC) y los códigos resultantes disponibles directamente o a través de periféricos o bus de procesador interno (Agusti Comes, 2010).

RSSI – Indicador de intensidad de señal recibida: El portador RSSI (Indicador de señal de fuerza de recepción) mide la potencia total promedio recibida observada solamente en los símbolos OFDM que contienen símbolos de referencia para el puerto de antena 0 (es decir, símbolo OFDM 0 y 4 en una ranura) en el ancho de banda de medición sobre los bloques de recursos N.

5.2.6 Función de Densidad de Probabilidad

En la teoría de la probabilidad, la función de densidad de probabilidad, función de densidad, o simplemente densidad de una variable aleatoria continua describe la probabilidad relativa según la cual dicha variable aleatoria tomará determinado valor.
La probabilidad de que la variable aleatoria caiga en una región específica del espacio de posibilidades estará dada por la integral de la densidad de esta variable entre uno y otro límite de dicha región.
La función de densidad de probabilidad (PDF) (Stirzaker, D)es positiva a lo largo de todo su dominio y su integral sobre todo el espacio es de valor unitario.

En un sentido más preciso, la PDF se utiliza para especificar la probabilidad de que la variable aleatoria caiga dentro de un rango de valores determinado, en lugar de tomar un valor cualquiera. Esta probabilidad viene dada por la integral de la PDF de esta variable sobre ese rango (Casella, G., & Berger, R. L), es decir, viene dada por el área bajo la función de densidad pero por encima del eje horizontal y entre los valores más bajos y más altos del rango como se visualiza en la figura 3. La función de densidad de probabilidad es no negativa en todas partes, y el área bajo la curva completa es igual a 1.

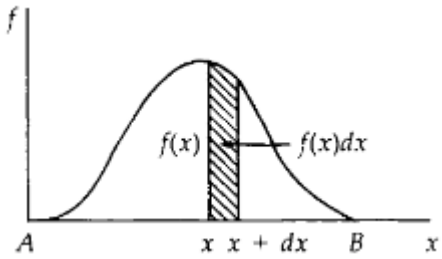


Figura 3 Función de densidad normal. (Robinson, E. A. (2013))

5.2.6.1 Función de Probabilidad Normal

La función de probabilidad normal está dada por la Fórmula 2 (Función de Densidad Normal) la cual se expresa de la siguiente manera:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\varphi)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Donde:
μ es la media de los valores de la señal.
σ es la desviación típica de los datos.

5.2.6.2 Función de Probabilidad Logística

La función de probabilidad logística se define con la Fórmula 3 (Blanco Castañeda, L.) y se representa de la siguiente manera:

$$f(x) = \frac{e^{\frac{-(x-\varphi)}{\sigma}}}{\sigma\left(1+e^{\frac{-(x-\varphi)}{\sigma}}\right)^2} \quad (3)$$

Donde:
μ es la media de los valores de la señal.
σ es la desviación típica de los datos.

5.2.6.3 Función de Probabilidad de Kernel

La Función de Probabilidad de Kernel se define como una función no paramétrica expresada en la fórmula 4:

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} + \sum_{i=1}^{n} K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (4)$$

Donde:
n es el número de datos
K está dada como una función de densidad de probabilidad
h es el ancho de banda calculado con la fórmula 5(López Herrera, E):

$$h = \sigma \sqrt[5]{\frac{4}{3n}} \approx \frac{1.06\sigma}{\sqrt[5]{n}} \quad (5)$$

sq2

5.2.6.4 Función de Probabilidad Valor Extremo.

La Función de Probabilidad de valor extremo está diseñada para normalizar la función en razón de su valor más grande, existen varios tipos de distribuciones de valor extremo pero la más común es la distribución Gumbel esto está dado por la fórmula 6(Solano, H. L.):

$$f(x) = \sigma^{-1} e^{\frac{(x-\varphi)}{\sigma}} e^{\left(-e^{\frac{(x-\varphi)}{\sigma}}\right)} \quad (6)$$

Donde:
μ es la media de los valores de la señal.
σ es la desviación típica de los datos.

5.2.7 NetMonster

NetMonster es una aplicación de monitoreo de red, de Android, que muestra información sobre redes móviles. Ofrece todos los datos que proporciona un teléfono inteligente a través de Android SDK; además de ser gratis y sin anuncios molestos. NetMonster es parcialmente de código abierto porque se basa en NetMonster Core, una biblioteca construida sobre Android Telephony SDK.

Las principales funcionalidades de la aplicación son: un registro de celdas a las que se conecta el teléfono; adivinar la ubicación del transmisor en función de los datos disponibles públicamente; edición del manual de celdas; posprocesamiento de datos registrados, trayendo más datos a las celdas vecinas; descarga de datos de ubicación precisos para transmisores en países y regiones admitidos y carga manual de los datos a los administradores de ubicación. (NetMonster,).

5.2.8 Análisis de Varianza

El análisis de varianza (ANOVA) es un método estadístico utilizado para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de dos o más grupos. Lo hace analizando la varianza dentro de cada grupo y comparándola con la varianza entre grupos. Si la varianza entre grupos es

significativamente mayor que la varianza dentro de los grupos, sugiere que hay diferencias significativas entre las medias de los grupos (Field, A. (2018)).

En el contexto del Análisis de Varianza (ANOVA), la prueba F de Fisher es una prueba estadística utilizada para determinar si las medias de varias poblaciones son iguales. La estadística de prueba tiene una distribución F bajo la hipótesis nula. Se utiliza con mayor frecuencia al comparar modelos estadísticos que se han ajustado a un conjunto de datos, con el fin de identificar el modelo que mejor se ajusta a la población de la cual se tomaron los datos.

5.2.8.1 Diferencia Honestamente Significativa

La prueba de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey es un método estadístico utilizado para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de múltiples grupos. Se utiliza comúnmente como una prueba post-hoc después de un ANOVA para determinar qué grupos específicos difieren entre sí (Field, A. (2018).

$$HSD = Multiplicador * \sqrt{\frac{Mse}{N}} \quad (7)$$

Donde:

N = Cantidad de datos por BTS.
Multiplicador = Valor hallado en la Tabla 9. (Comparaciones Múltiples de test de Tukey).
Usando los valores de grados de libertad entre grupos y dentro de los grupos, teniendo en cuenta el factor usado para el análisis de varianza (0.05).
Mse = Valor hallado con la división entre la suma de los cuadrados y los grados de libertad dentro de los grupos.

5.2.9 Distancia Geográfica

La distancia geográfica es una medida que indica la distancia entre dos puntos en la superficie terrestre. La fórmula para calcular la distancia geográfica depende del sistema de coordenadas que se utilice, pero la más comúnmente utilizada es la fórmula del Haversine.

La fórmula del Haversine se basa en la ley de los cosenos y se utiliza para calcular la distancia entre dos puntos en la superficie terrestre considerando la curvatura de la Tierra. Esta fórmula toma en cuenta la latitud y la longitud de ambos puntos, y está expresada en la fórmula 8 (Meeus, 1998):

$$d = 2r * arcsin\left(\sqrt{sin^2\left(\frac{\phi_2-\phi_1}{2}\right) + cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\, sin^2\left(\frac{\lambda_2-\lambda_1}{2}\right)}\right) \quad (8)$$

Donde:
ϕ_2 , ϕ_1 son la latitud del punto 1 y la latitud del punto 2, respectivamente.
λ_2 , λ_1 son la longitud del punto 1 y la longitud del punto 2.
r es el radio de la tierra.

5.3 Marco Legal

Las normas que rigen este tema están dadas por la Resolución N° 754 del 20 de octubre de 2016, publicada por la Agencia Nacional del Espectro. "Por la cual se reglamentan las condiciones que deben cumplir las estaciones radioeléctricas, con el objeto de controlar los niveles de exposición de las personas a los campos electromagnéticos y se dictan disposiciones relacionados con el despliegue de antenas de radiocomunicaciones", en virtud de lo establecido con los artículos 43 y 193 de la Ley 1753 de 2015 y se deroga la Resolución 387 de 2016. (Resolución 754 de 2016).

6. Metodología

Para el desarrollo de esta investigación se inició con la búsqueda de cómo obtener de la mejor manera los datos. Para ello, se optó por diferentes tipos de analizadores especializados, pero debido a su precio elevado se busca una opcion más asequibles. Actualmente, los celulares cuentan con antenas lo suficientemente sensibles como para ser una opción viable; por lo cual se optó por usar el celular de la marca Xiaomi modelo m2101k7bl (Redmi Note 10s), el cual cuenta con un gran número de bandas de frecuencia de tecnología 4G LTE, como se observa en la Tabla 7.

TECNOLOGÍA	BANDA Y FRECUENCIA
Redes 2G (GSM)	850-900-1800-1900 MHz
Redes 3G (WCDMA):	850-900-2100 MHz
Redes 4G (LTE FDD):	B1/2/3/4/5/7/8/20/28
Redes 4G (LTE TDD):	B38/40/41(2535-2655MHz)
Redes 5G	NO SOPORTA

Tabla 7 Bandas de Frecuencia Xiaomi modelo m2101k7bl (Redmi Note 10s). (Xiaomi.co, s.f.)

Para realizar las medidas de las señales se buscó un aplicativo móvil que permitiera obtener las componentes de las señales propuestas para el desarrollo del proyecto. Por esta razón, se optó por el aplicativo NetMonster para la toma de datos, la red móvil sobre la cual se hace la recolección es del operador móvil CLARO. Además, se utilizó el aplicativo Google Maps para tomar los datos geográficos al momento de la recolección de las componentes de la señal 4G. De esta manera, se ubican las BTS a las cuales se les realizó las mediciones y se obtienen las rutas presentadas a continuación.

6.1 Medición de los Parámetros

A continuación, se muestran las 5 rutas sobre las cuáles se toman las medidas en la ciudad de Bogotá para cada una de las BTS, se toma una muestra de 100 por ruta la cuales se puede ver en el anexo 1, para realizar un análisis en el cual se pueda abarcar un mayor número de situaciones las rutas tienen diferencias significativas respecto a su locación, perfil de elevación y uso de suelo como se puede observar en el desarrollo del documento.

6.1.1 Ruta 1

La Ruta 1 se toma en una sección semi montañosa en el barrio residencial 20 de Julio de la ciudad de Bogotá con una altura promedio de las viviendas de 2 a 3 pisos. Esta puede ser observada en la Figura 4.

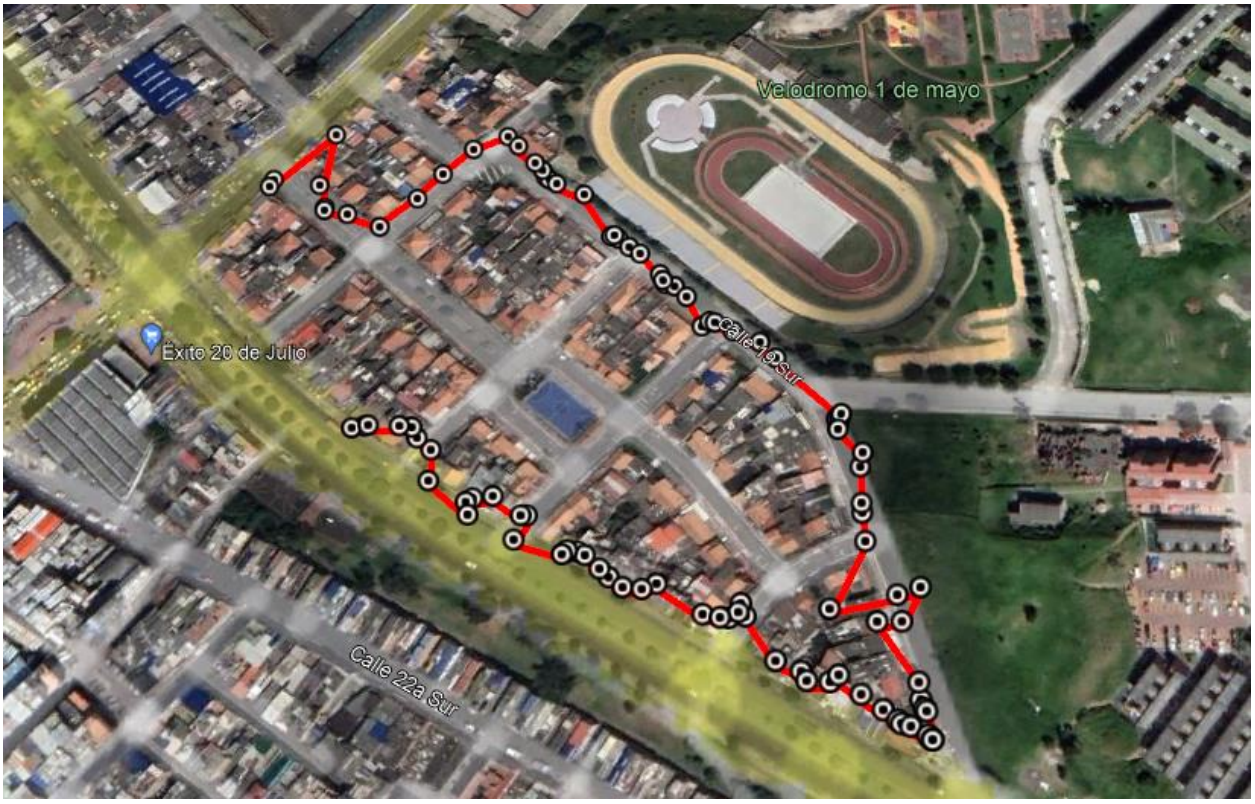


Figura 4 Vista Google Earth Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia

En la figura 4 se puede observar el perfil de elevación obtenido durante el muestreo de datos, en el cual se evidencia el cambio de elevación en la ruta manteniendo siempre línea de vista directa con la BTS.

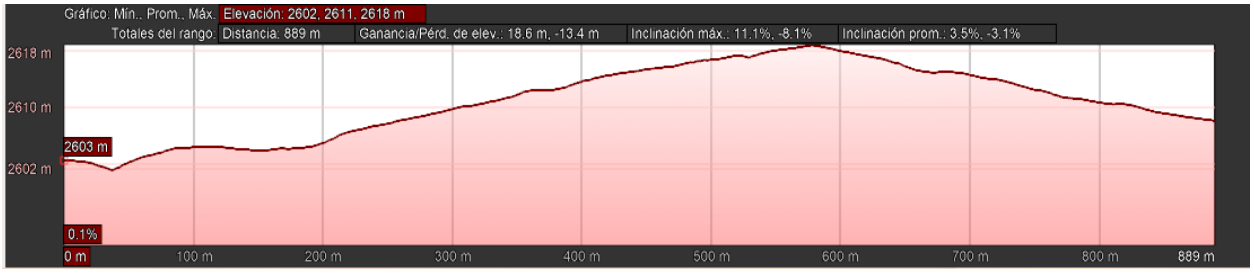


Figura 5 Elevación de la Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia

6.1.2 Ruta 2

La segunda ruta se ubicó en el sector de El Salitre de la ciudad de Bogotá, sobre inmediaciones del Centro Comercial Salitre y el Centro Empresarial Plaza Claro en el cual se encuentran ubicados un gran número de locales comerciales y oficinas, esta zona se encuentra altamente poblada por conjuntos residenciales de 5-10 pisos de altura y un alto flujo vehicular. Se optó por realizar un muestreo enfocado en abarcar la mayor área obteniendo la siguiente ruta mostrada en la Figura 6.



Figura 6 Vista Google Earth Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 7 se podrá observar que el terreno es llano por lo cual el perfil de elevación obtenido en esta ruta tiene una tendencia plana, la línea de vista a la antena se encuentra obstruida en varios momentos por los edificios adyacentes.



Figura 7 Elevación de la Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia

6.1.3 Ruta 3

La Ruta número 3 se toma en el barrio residencial Paulo VI en la ciudad de Bogotá, la altura promedio de las edificaciones es de 2 pisos de altura como se puede evidenciar en la figura 8. Cerca de este lugar se encuentran zonas de alta concurrencia como lo son el Parque de los Novios o la Biblioteca Virgilio Barco.



Figura 8 Vista Google Earth Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia

En su perfil de elevación observado en la Figura 9 se puede encontrar un terreno plano sin ningún obstáculo directo con la línea de vista a la BTS.

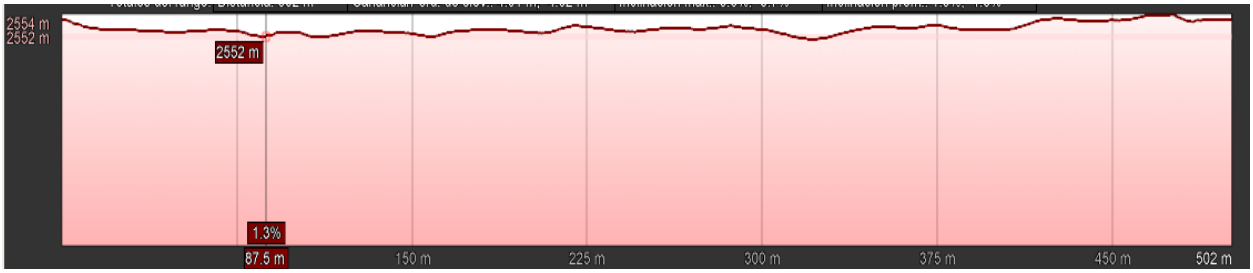


Figura 9. Elevación de la Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia

Figura 9 Elevación de la Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia

6.1.4 Ruta 4

La Ruta número 4 se encuentra en los alrededores del Parque el Virrey de la ciudad de Bogotá, en la zona se puede encontrar una zona comercial concurrida y grandes zonas verdes como se observa en la figura 10.



Figura 10 Vista Google Earth Ruta 4. Fuente: Elaboración Propia

La Ruta número 4 se toma en un terreno plano como se observa en el perfil de elevación en la Figura 11, cuenta con estructuras en promedio de 5 pisos de altura y vegetación natural que limita la línea de vista directa con la BTS.

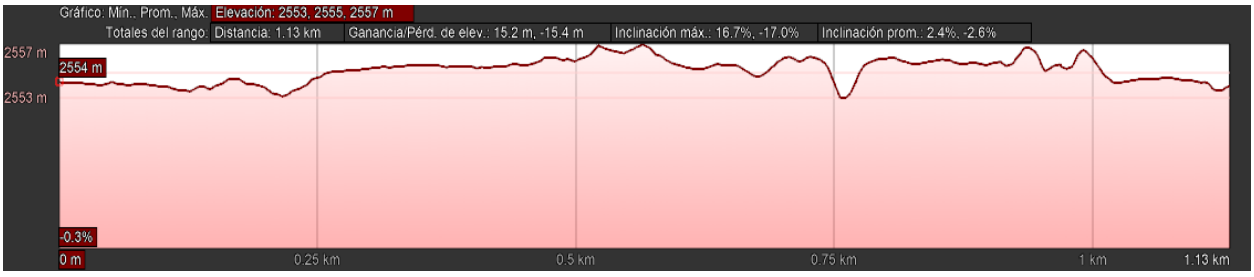


Figura 11 Elevación de la Ruta 4. Fuente: Elaboración Propia

6.1.5 Ruta 5

La Ruta número 5 está ubicada en la zona industrial de Montevideo en la ciudad de Bogotá, en esta zona se encuentra un gran número de industrias y tránsito de personas, por lo cual se caracteriza por tener bodegas de 4 pisos de altura en promedio. Esta se puede ver en la Figura 12 a continuación.

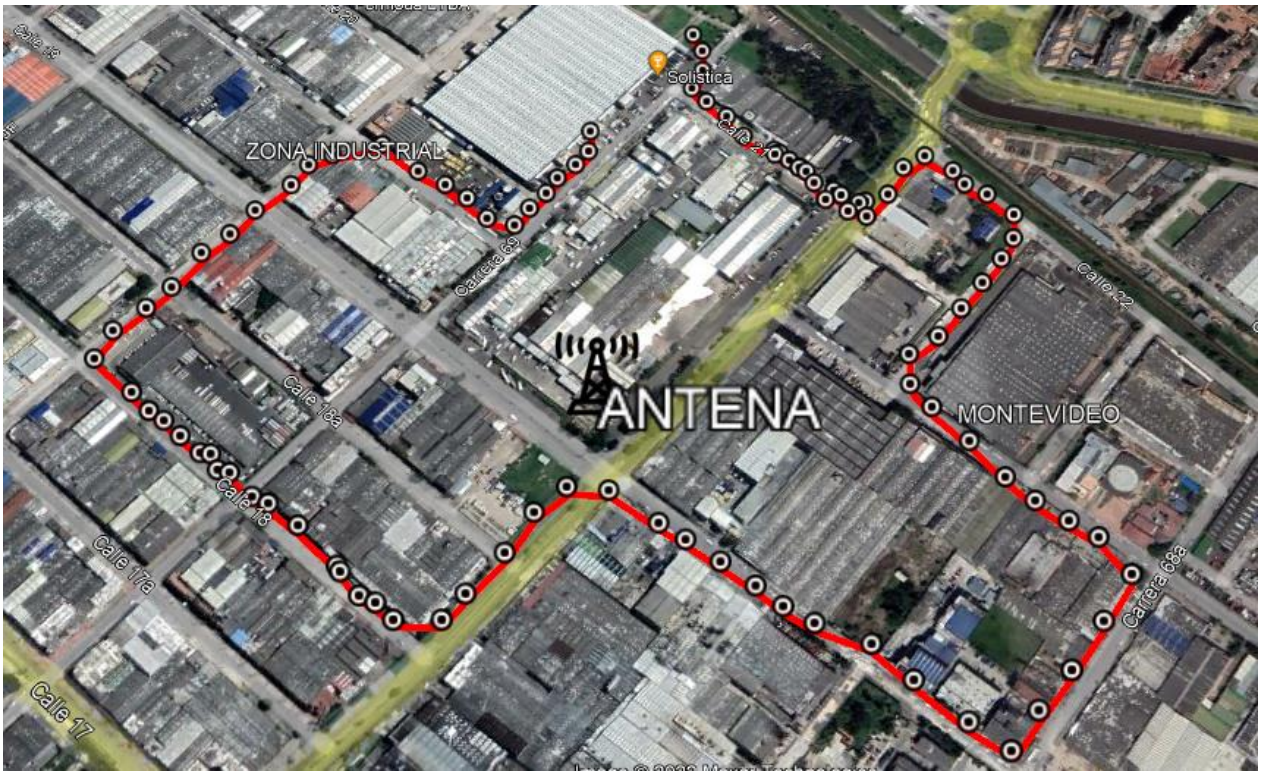


Figura 12 Vista Google Earth Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia

En el perfil de elevación de la Figura 13 se observa una zona sin cambios de elevación relevantes, la línea de vista a la BTS se encuentra con obstáculos debido a las distancias y el tamaño de las edificaciones que se encuentran en la zona.

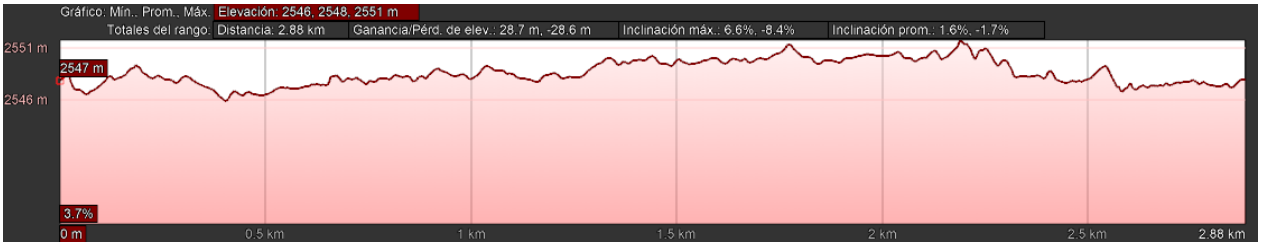


Figura 13 Elevación de la Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia

6.2 Registro de Datos

Posteriormente, con la recolección de datos en marcha, se registran las medidas de los componentes a analizar. Se toma como referencia la antena cercana a las rutas mostradas anteriormente y se obtienen los datos de esta, se referencia el identificador único de la antena eNb y se inicia el registro de manera manual de las componentes RSSI, RSRP y RSRQ, este proceso se realiza mediante el software para dispositivos móviles NetMonster el cual proporciona los datos como se ilustra en la figura 14 a las 17.

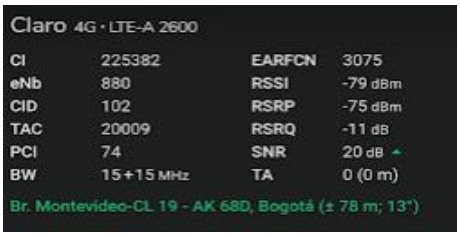


Figura 14 Registro de datos 1 Obtenido mediante la App NetMonster. Fuente: Elaboración Propia



Figura 15 Registro de datos 2 Obtenido mediante la App NetMonster. Fuente: Elaboración Propia

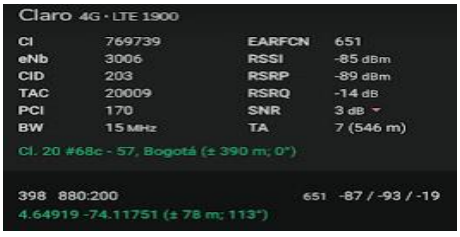


Figura 16 Registro de datos 3 Obtenido mediante la App NetMonster. Fuente: Elaboración Propia



Figura 17 Registro de datos 4 Obtenido mediante la App NetMonster. Fuente: Elaboración Propia

Los datos obtenidos se tabulan para su posterior análisis (ver anexo 1) utilizando el software Excel. Cada una de las medidas se relaciona en una tabla con la posición geográfica en la cual fue tomada, a partir de estas coordenadas obtenidas en las rutas y la posición de la antena se calcula la distancia del punto de medición a la antena utilizando la fórmula 8.
Para analizar los datos recogidos, se genera una matriz de análisis descriptivo de todas las rutas medidas, esta matriz proporciona los datos necesarios para realizar el análisis de densidad de probabilidad. La Tabla 8 muestra un ejemplo de los datos obtenidos a partir de la matriz.

	Latitud	*Longitud*	*RSSI*	*RSRP*	*RSRQ*	*SNR*	*DIISTANCIA(m)*
Latitud	1						
Longitud	-0,9730486794	1					
RSSI	-0,9721033894	0,9999769941	1				
RSRP	-0,9736738969	0,9999703748	0,9999749257	1			
RSRQ	-0,9560727394	0,997839324	0,9981291721	0,9976978214	1		
SNR	0,9190790288	-0,8137376335	-0,8106444506	-0,8141250508	-0,7741806318	1	
DIISTANCIA(m)	0,9106744632	-0,9385144486	-0,9369832022	-0,9363601613	-0,935657745	0,7918067683	1
Media	4,571843181	-74,08959967	-54,86	-86,53	-12,5	1,58	115,5770137
Error típico	0,000083444930	0,000071473751	0,5045289833	0,7322933397	0,2376229081	0,4223981558	6,44026527
Mediana	4,5717035	-74,089573	-51,5	-83,5	-12	1	108,0755002
Moda	4,571951	-74,088633	-51	-82	-12	0	121,0895911
Desviación estándar	0,000834449300	0,000714737517	5,045289833	7,322933397	2,376229081	4,223981558	64,4026527
Varianza de la muestra	0,000000696305	0,000000510849	25,45494949	53,62535354	5,646464646	17,8420202	4147,701674
Curtosis	0,3145847769	-0,9376987594	-0,7373887774	-0,6179442986	-0,1533447891	-0,1091397332	-0,3008433743
Coeficiente de asimetría	-0,2553413652	-0,2703324026	-0,9453168655	-0,7744230885	-0,444787295	-0,03104242848	0,5386550241
Rango	0,00432	0,002907	14	29	12	23	272,2683732
Mínimo	4,56893	-74,09113	-65	-105	-20	-10	3,903907524
Máximo	4,57325	-74,088223	-51	-76	-8	13	276,1722808
Suma	457,1843181	-7408,959967	-5486	-8653	-1250	158	11557,70137
Cuenta	100	100	100	100	100	100	100
Nivel de confianza(95,0%	0,000165572844	0,000141819429	1,001094961	1,453028858	0,4714954024	0,8381295811	12,77888352

Tabla 8 Matriz de Análisis Descriptivo Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia.

De la matriz de análisis descriptivo se destaca el uso de la media la cual define la tendencia central de los datos y la desviación estándar la cual es un valor que indica la dispersión de los datos respecto a la media, debido a que son necesarios para el desarrollo de los cálculos de las funciones de densidad vistas de la fórmula 2 a la 5.

6.3 Análisis de la Variación de Potencia en el Muestreo

A Continuación, se generan las gráficas con relación al comportamiento de las potencias de las señales durante el recorrido de las rutas, este desarrollo se realiza sobre el software matlab 2020a donde se compara directamente el comportamiento de la señal durante el recorrido (anexo 2), se observa las gráficas resultantes de este análisis en las Figuras 18 a 22.

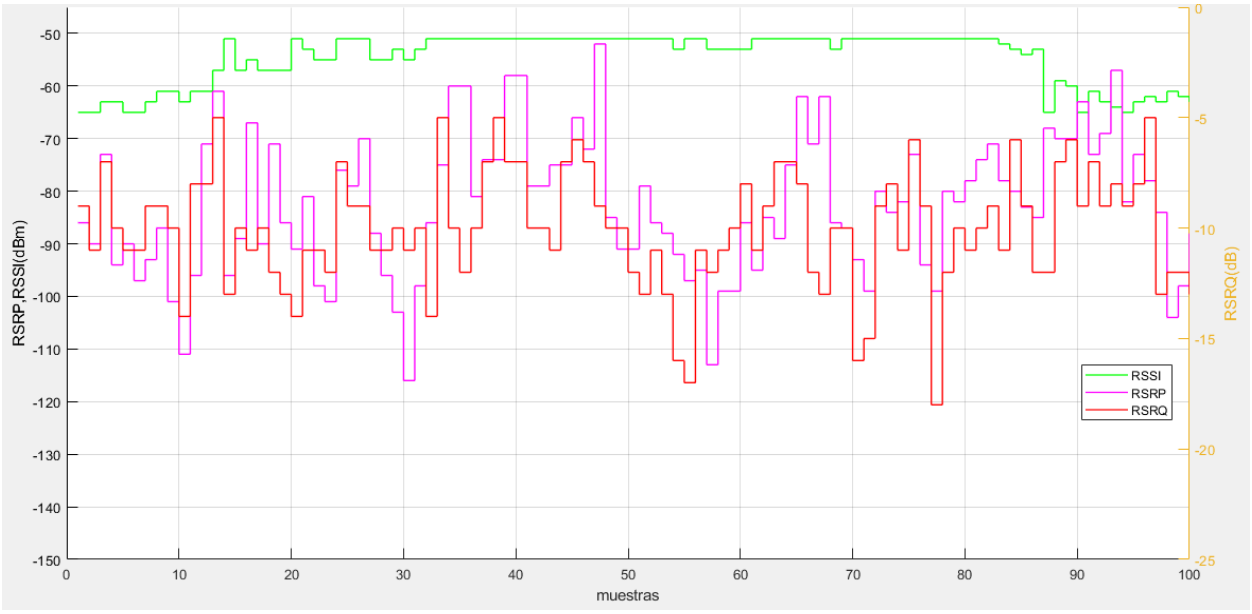


Figura 18 Medidas de potencias RSRP, RSSI y RSRQ de la ruta 1. Fuente: Elaboración Propia

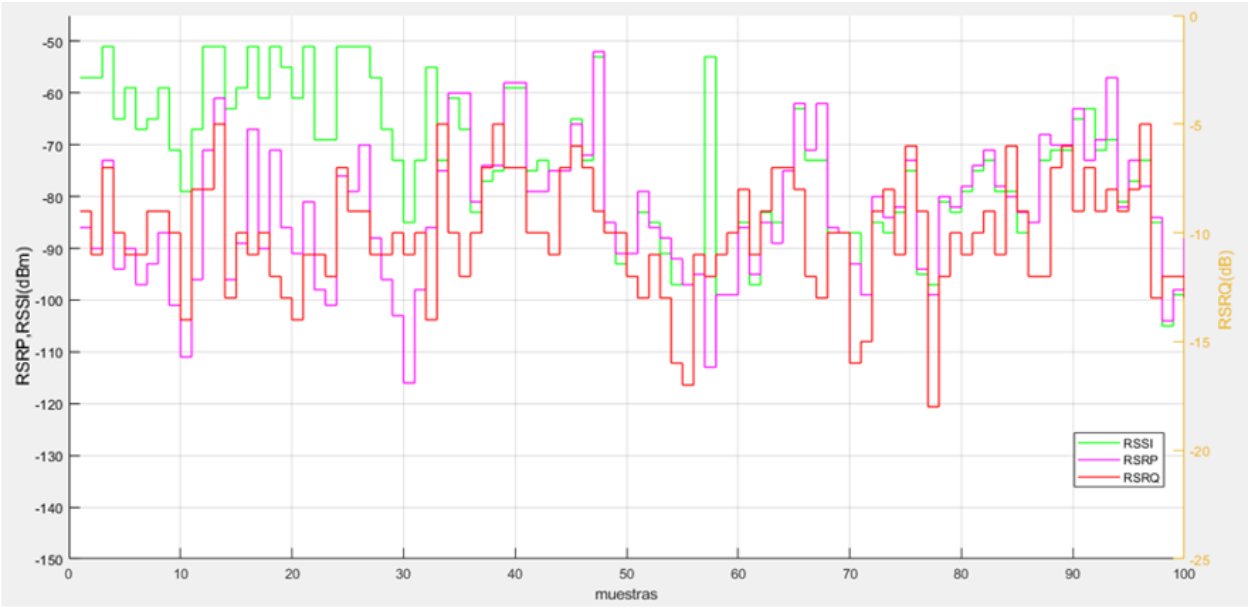


Figura 19 Medidas de potencias RSRP, RSSI y RSRQ de la ruta 2. Fuente: Elaboración Propia

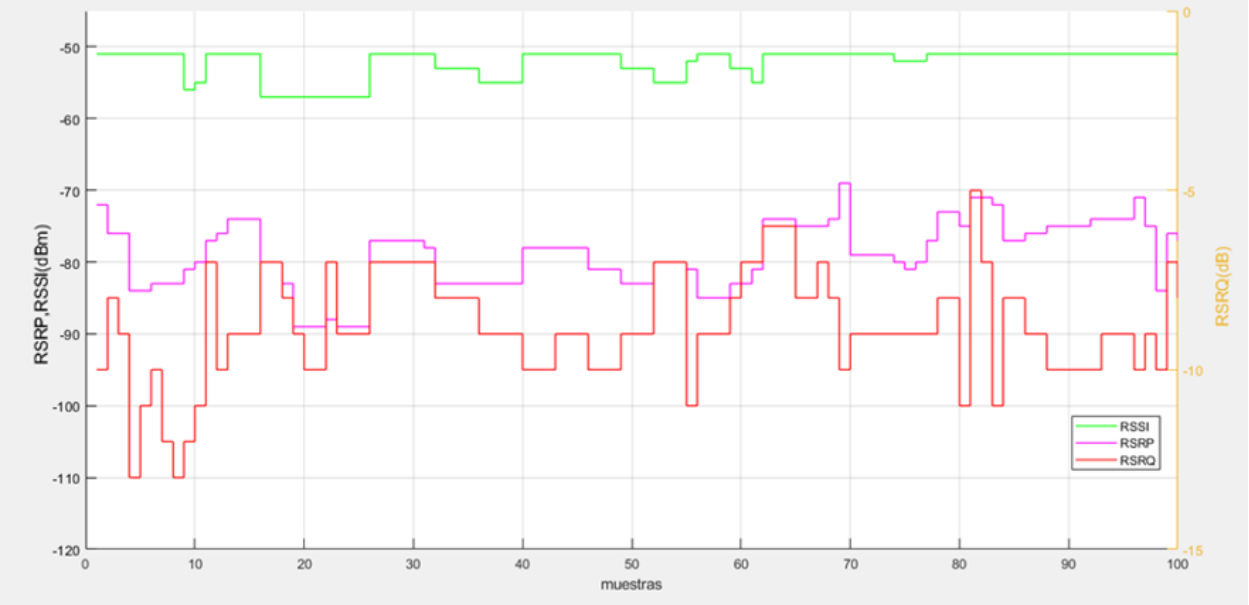


Figura 20 Medidas de potencias RSRP, RSSI y RSRQ de la ruta 3. Fuente: Elaboración Propia

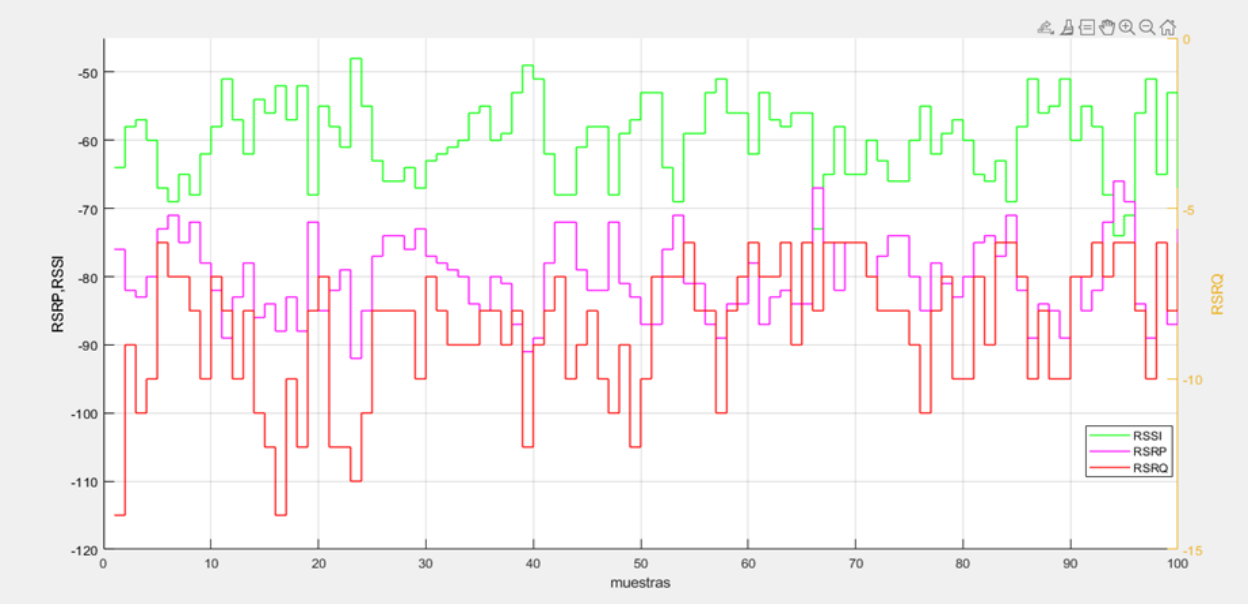


Figura 21 Medidas de potencias RSRP, RSSI y RSRQ de la ruta 4. Fuente: Elaboración Propia

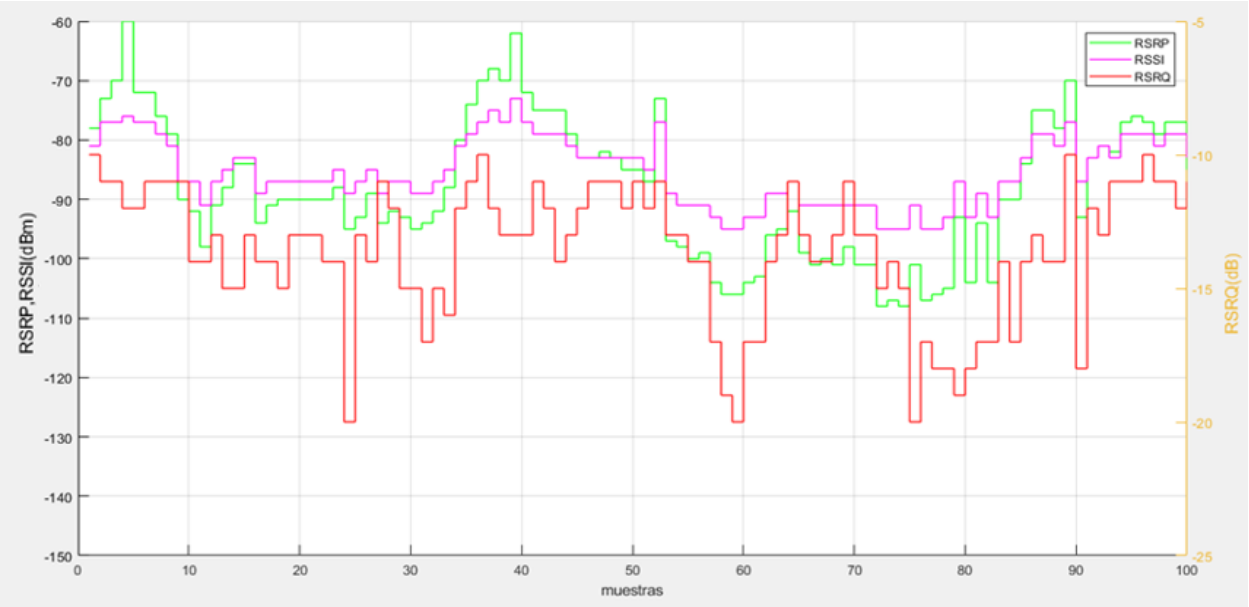


Figura 22 Medidas de potencias RSRP, RSSI y RSRQ de la ruta 5. Fuente: Elaboración Propia

Gráficamente se observa que el comportamiento de la componente RSSI depende de la línea de vista directa a la BTS, se evidencia en la ruta 1 y 3 las cuales al ser zonas residenciales con edificaciones de baja altura, el indicador de intensidad de la señal se mantiene alto y constante durante toda la ruta, por otra parte para las rutas 2, 4 y 5 en las cuales el indicador de intensidad de señal se ve afectado por las interferencias de las edificaciones y árboles de gran altura.

Además, con el comportamiento de las componentes RSRP y RSRQ se puede analizar que tienen correlación con la distancia respecto a la antena, como se evidencia en las rutas 1, 2, 4 y 5 donde las rutas tienen una gran variación de la distancia a la antena lo que reduce la potencia y la calidad recibida. En el caso de la ruta 3 que se puede observar en la figura 8, la ruta tomada tiene componentes lineales lo cual muestra un comportamiento más estable de las señales en comparación con las demás rutas.

6.4 Evaluación los Parámetros en Relación con la Distancia a la Estación Base

A partir del cálculo de la distancia respecto de la BTS que se realiza en el tratamiento de datos, se generan las gráficas de Potencia medida respecto a la Distancia de la antena, el resultado de este análisis se muestra en las Figuras 23 a 27.

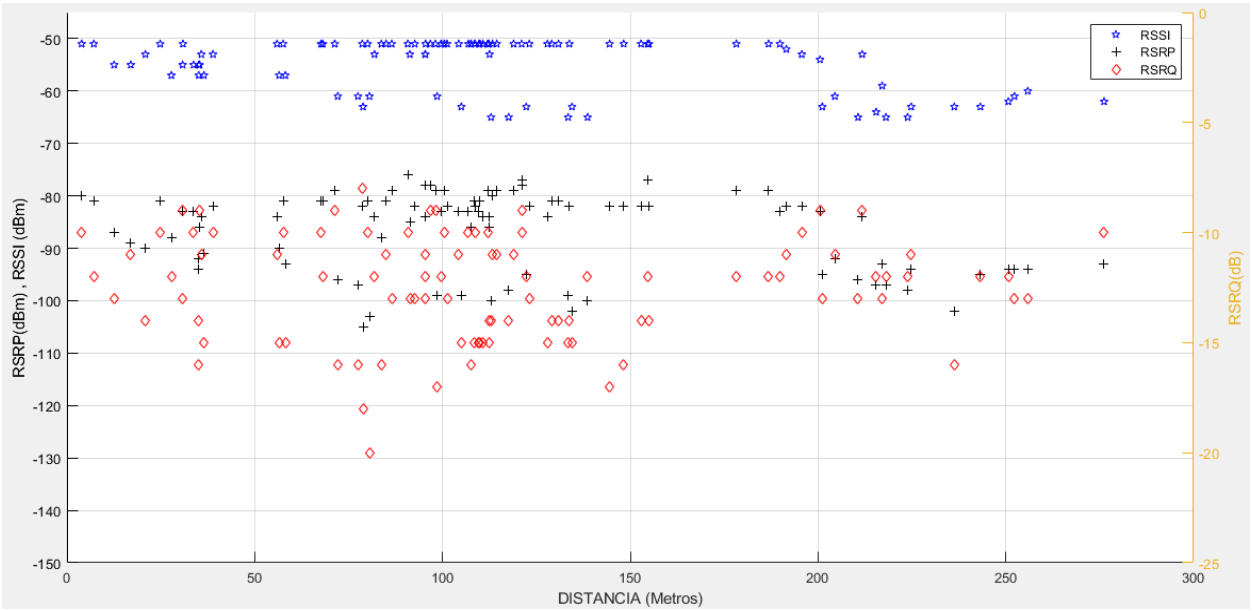


Figura 23 Potencia Respecto a la Distancia Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia

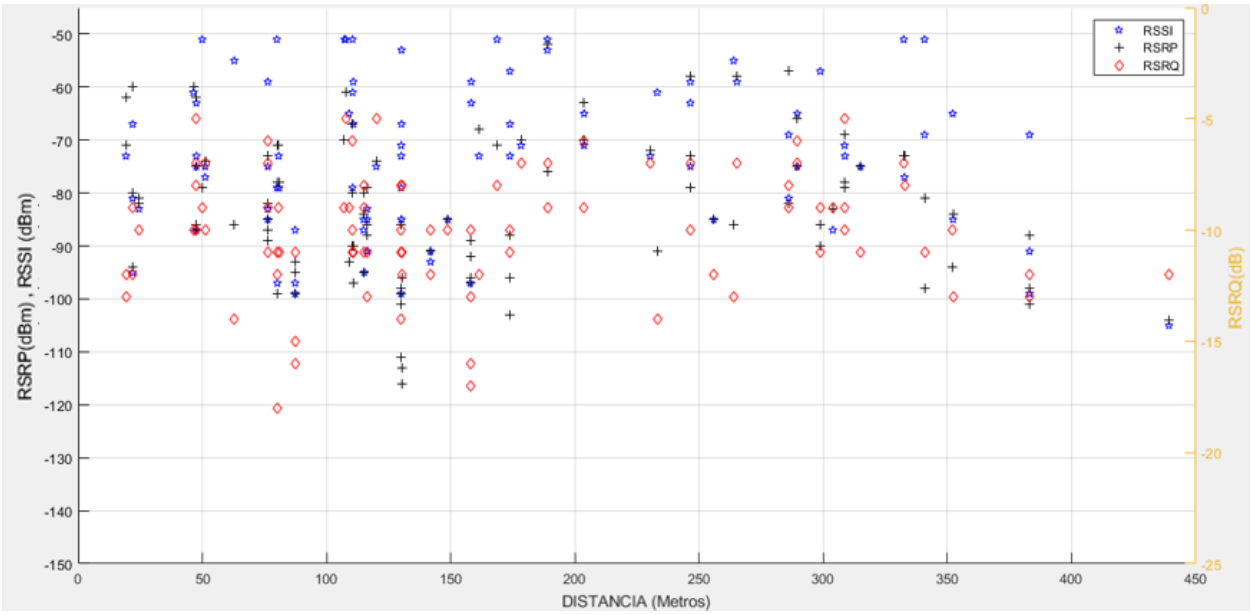


Figura 24 Potencia Respecto a la Distancia Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia

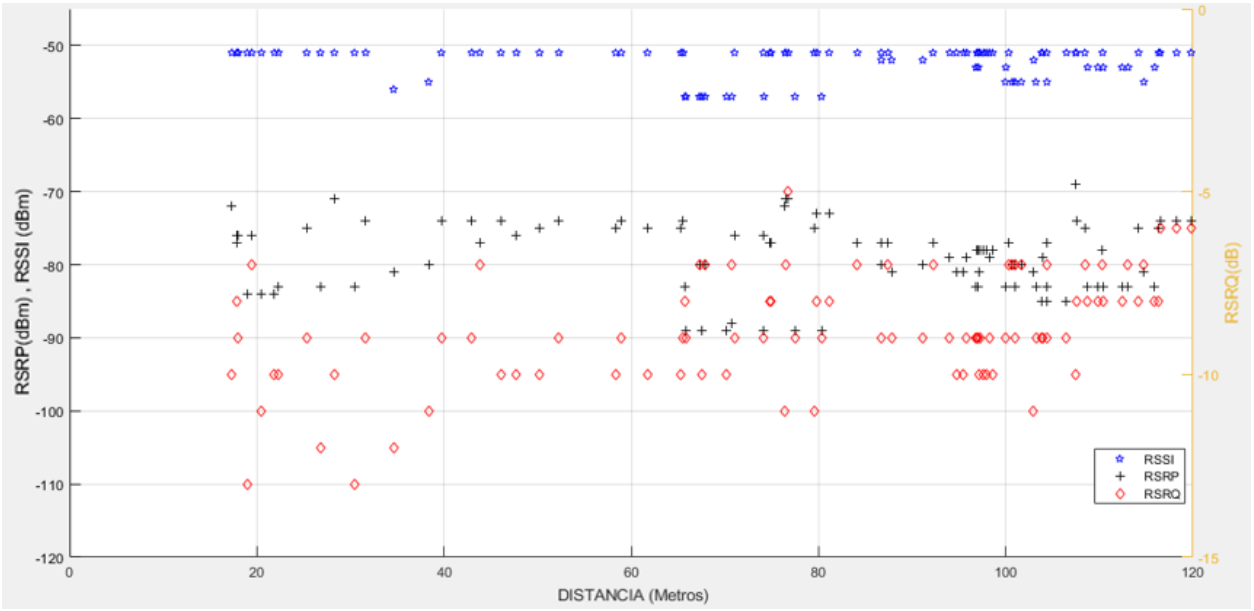


Figura 25 Potencia Respecto a la Distancia Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia

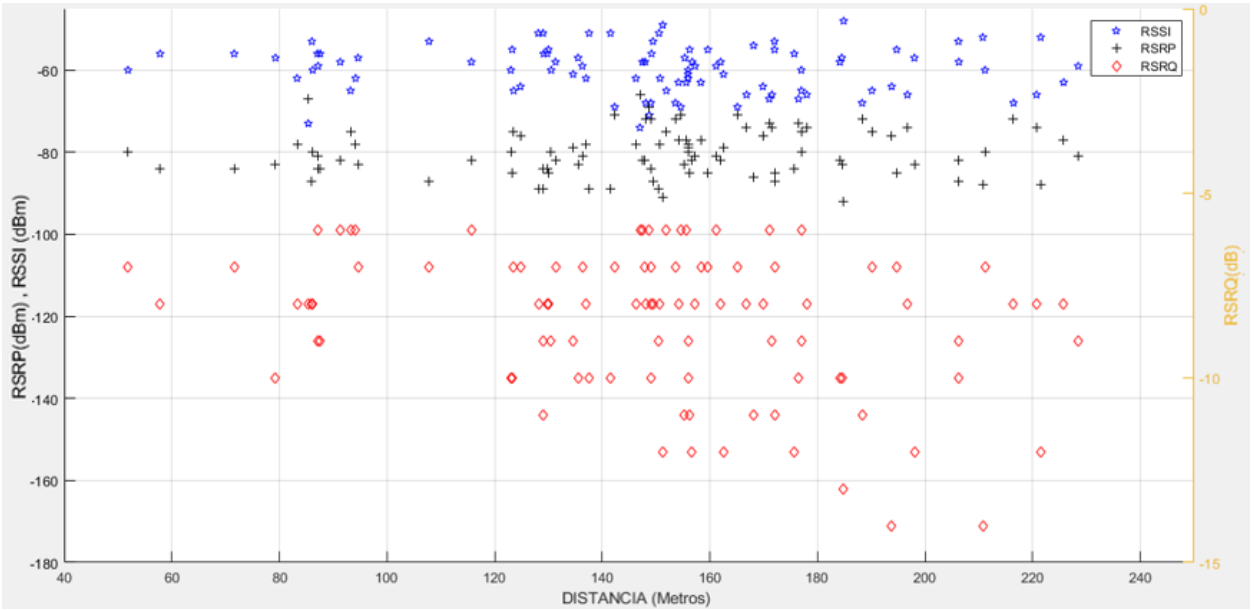


Figura 26 Potencia Respecto a la Distancia Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia

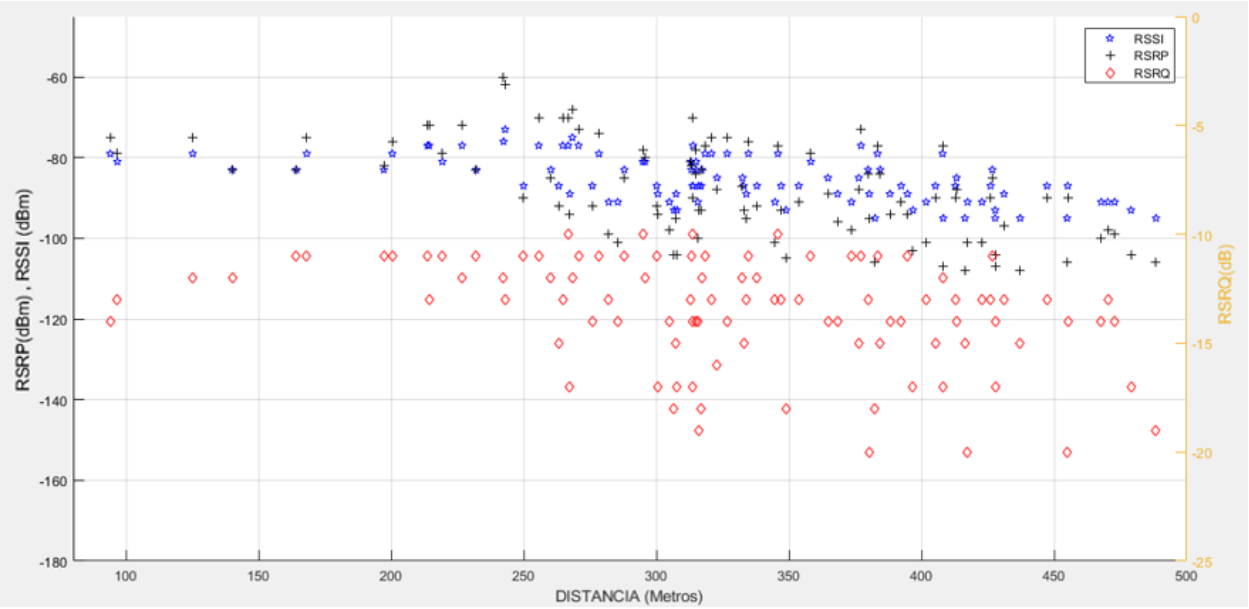


Figura 27 Potencia Respecto a la Distancia Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia

Gráficamente se observa que durante los primero 250 metros las componentes RSSI, RSRP y RSRQ mantiene un nivel alto si no se encuentran obstáculos en la línea de vista directa a la BTS, como se puede evidenciar en las rutas 1, 3, 4 y 5. Cabe resaltar que la ruta 2 se evidencia una variación importante en los primeros 250 metros debido a la presencia de numerosos obstáculos en la zona en la que se encuentra.

Por otra parte, se puede observar que a mayor distancia, los niveles de RSRP y RSRQ disminuyen considerablemente, mientras que en el caso de la RSSI se aprecia una disminución de la señal menos pronunciada.

6.5 Gráficas de Funciones de Densidad de Probabilidad

Para el análisis de las funciones de densidad de probabilidad en este estudio, se utilizan cuatro funciones; probabilidad normal, valor extremo, Kernel y logística, La elección de estas funciones se basan en su capacidad para incluir valores negativos, como los que se encuentran mediciones de potencia de la señal 4G.

En esta sección se generan las gráficas de densidad a partir de la Fórmula 2 a la 5 utilizando el software Matlab 2020a para el desarrollo gráfico (anexo 3), estas funciones son normalizadas para realizar la comparación respecto al histograma de los valores para facilitar el análisis gráfico, como se puede observar de la Figura 28 a la Figura 42, agrupadas a continuación de acuerdo con las rutas y las componentes.

6.5.1 Ruta 1

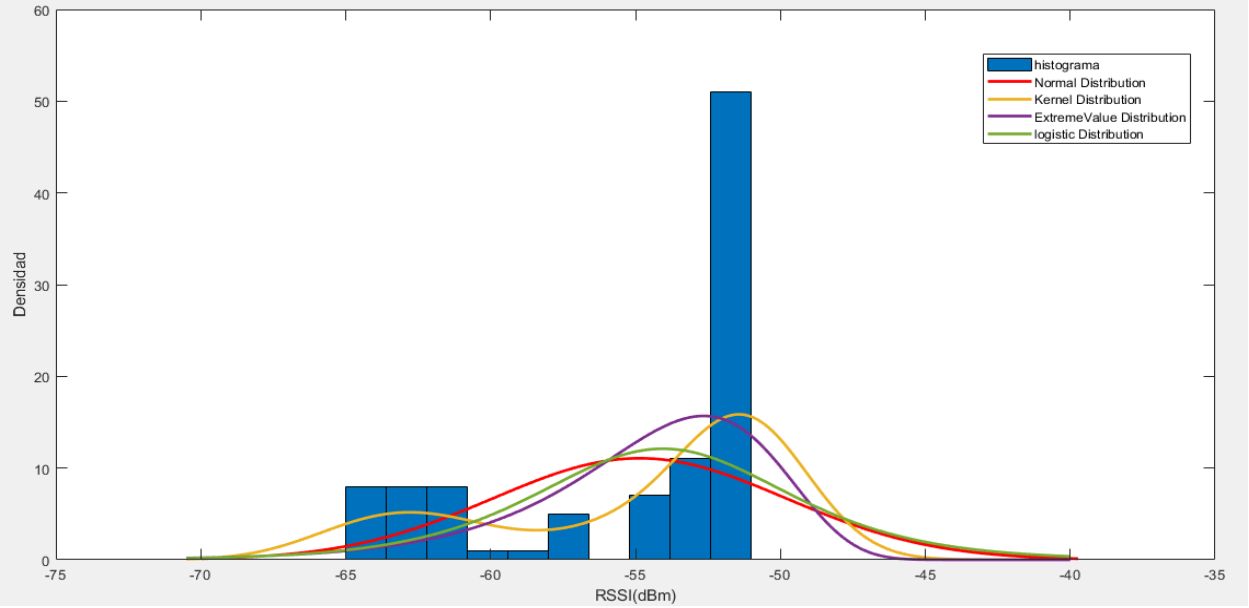


Figura 28 Distribución de probabilidad para RSSI de la Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia

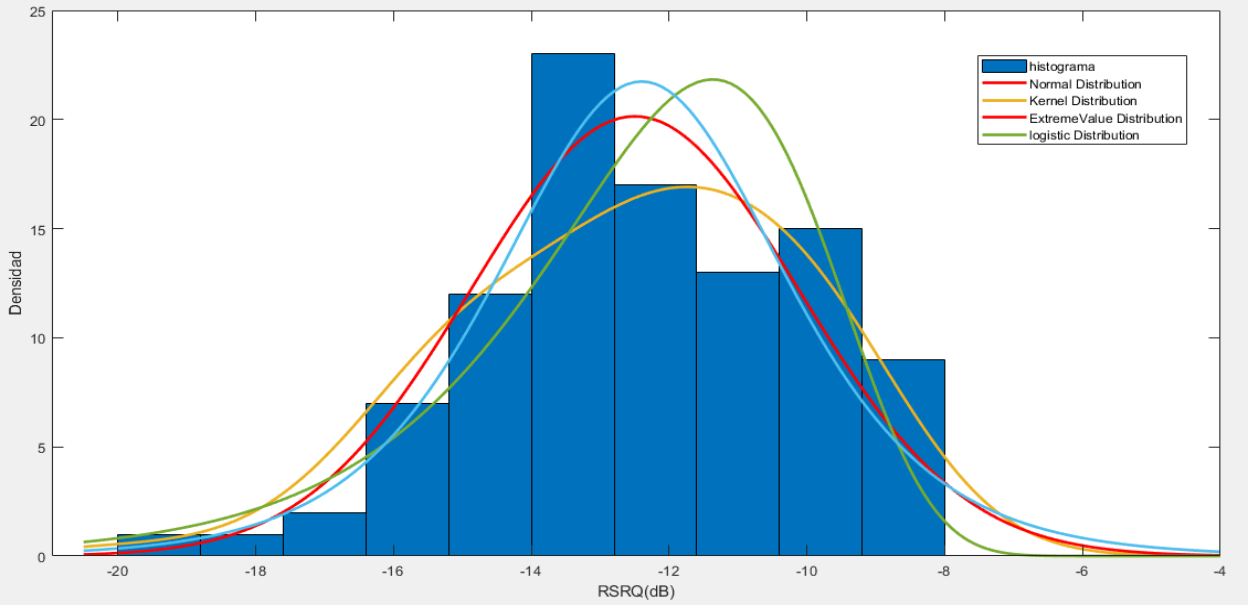


Figura 29 Distribución de probabilidad para RSRQ de la Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia

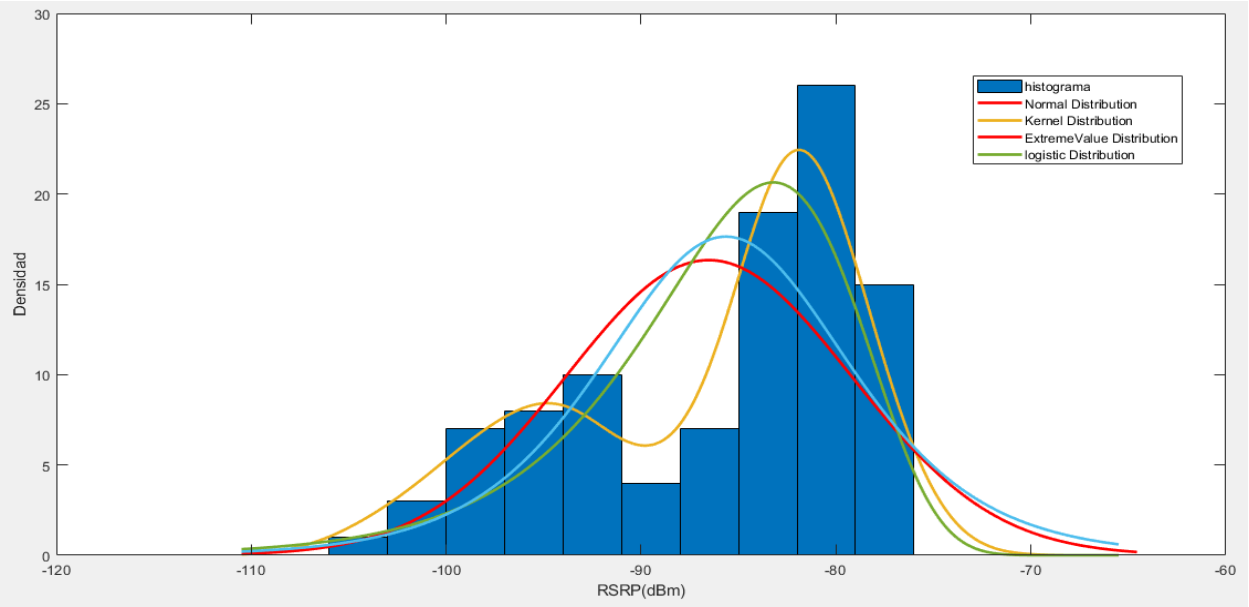


Figura 30 Distribución de probabilidad para RSRP de la Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que la componente RSSI y RSRP tiene una concentración de datos en un punto específico lo cual impide tener una aproximación gráfica más cercana a los valores reales, se puede evidenciar que la función Kernel con estos tipos de valores tienen un mejor comportamiento. Para la componente RSRQ se observa una distribución de datos más uniforme lo cual permite que las gráficas de densidad se acoplen a la forma de los datos.

6.5.2 Ruta 2

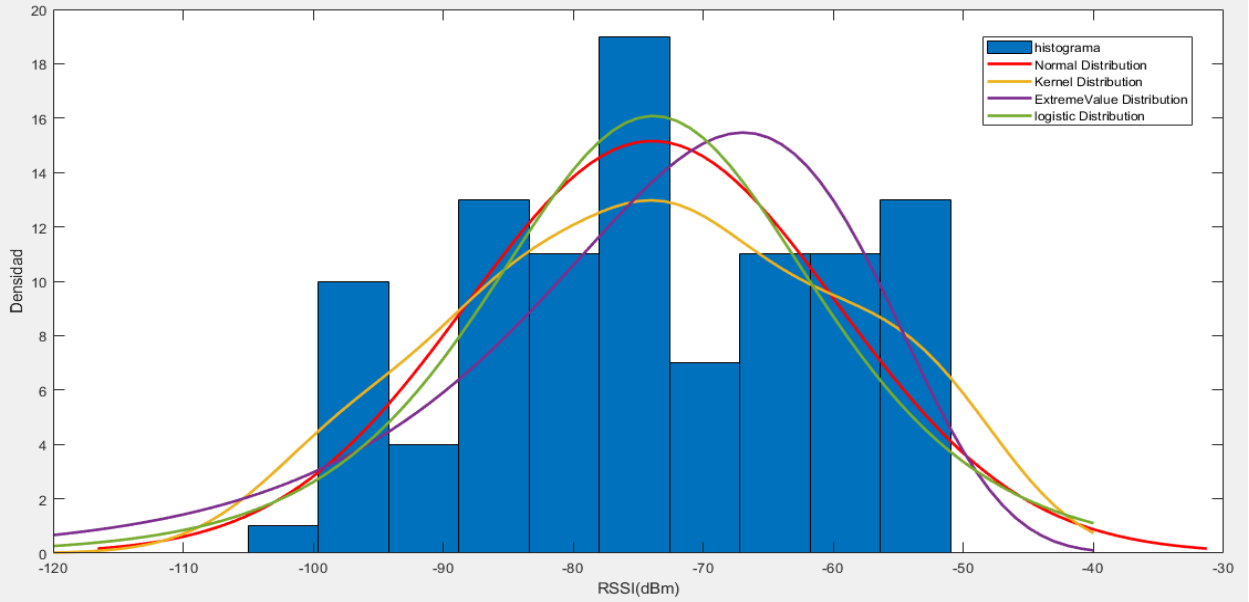


Figura 31 Distribución de probabilidad para RSSI de la Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia

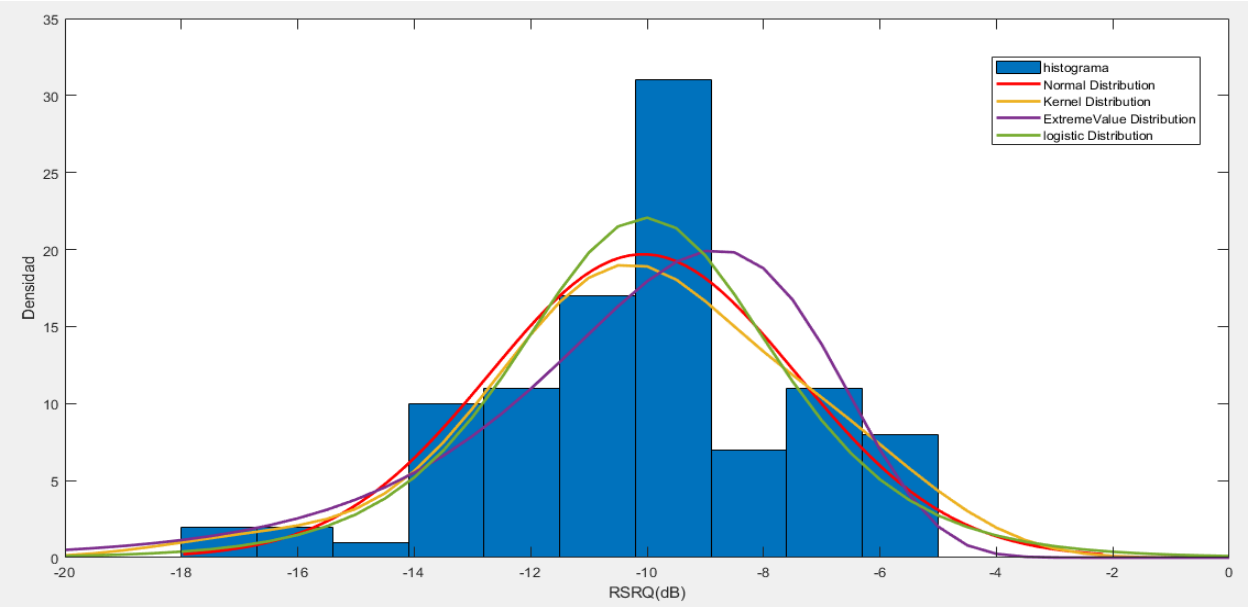


Figura 32 Distribución de probabilidad para RSRQ de la Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia

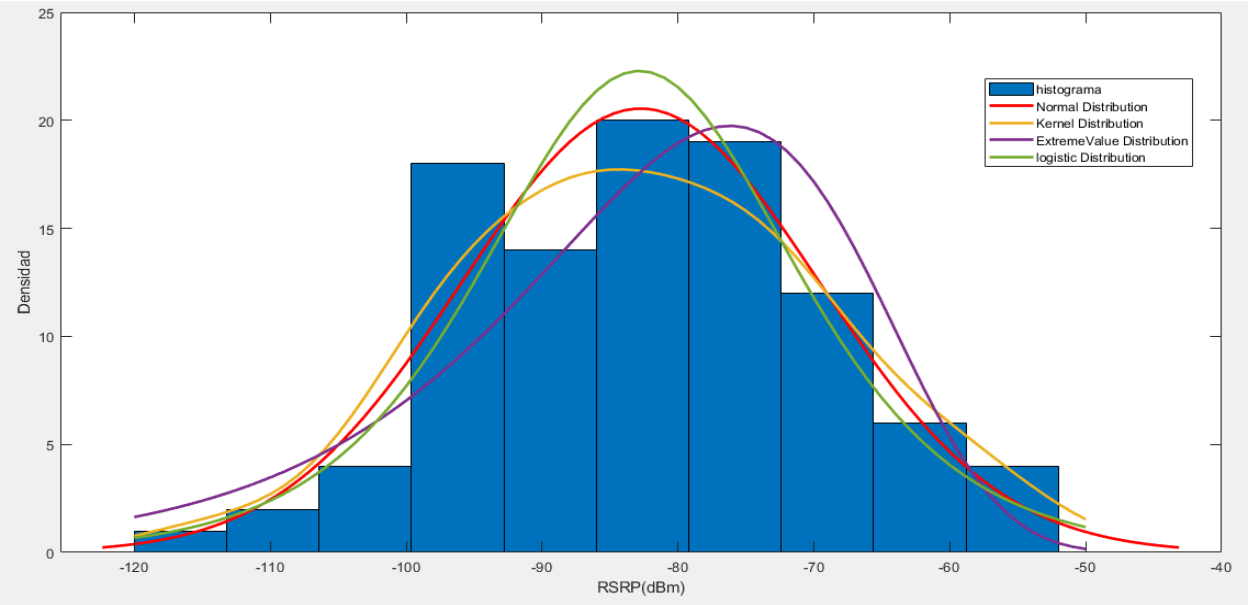


Figura 33 Distribución de probabilidad para RSRP de la Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia

Para las componentes RSRQ, RSSI y RSRP se observa una distribución de datos uniforme lo cual permite que las gráficas de densidad se acoplen a la forma de los datos y las gráficas sean significativamente cercanas entre sí.

6.5.3 Ruta 3

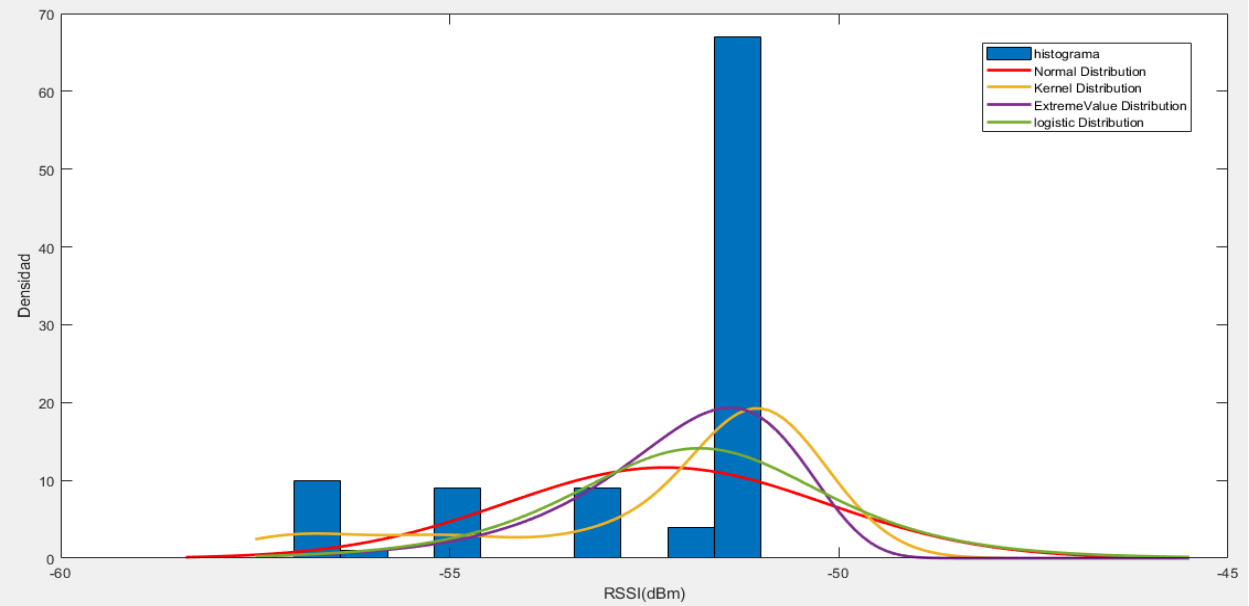


Figura 34 Distribución de probabilidad para RSSI de la Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia

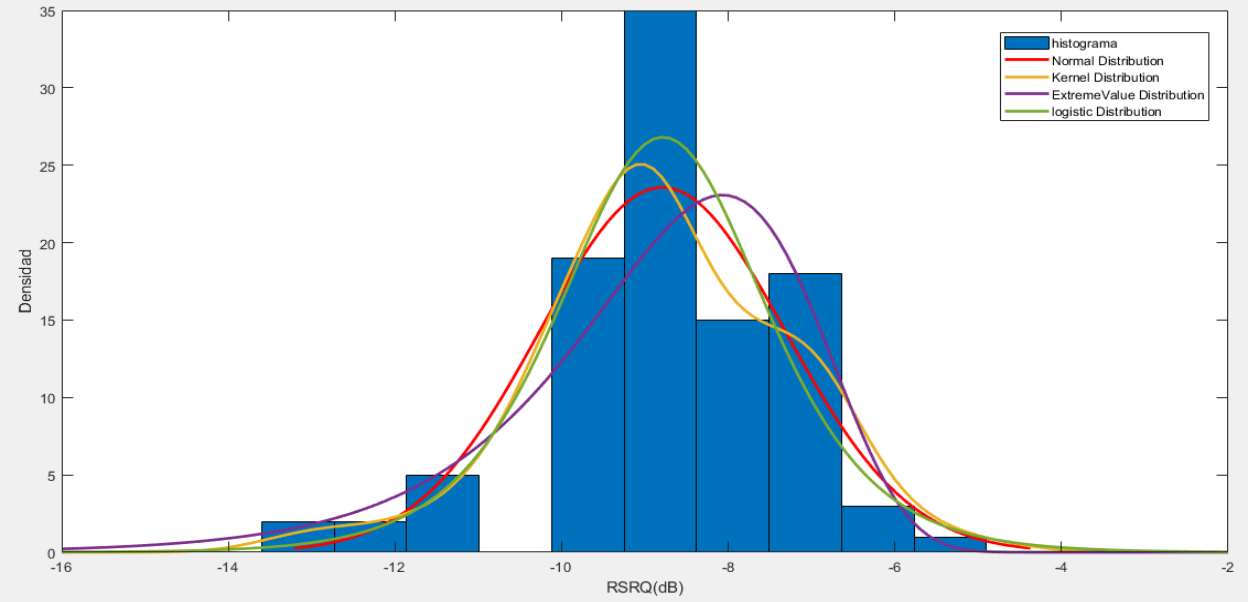


Figura 35 Distribución de probabilidad para RSRQ de la Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia

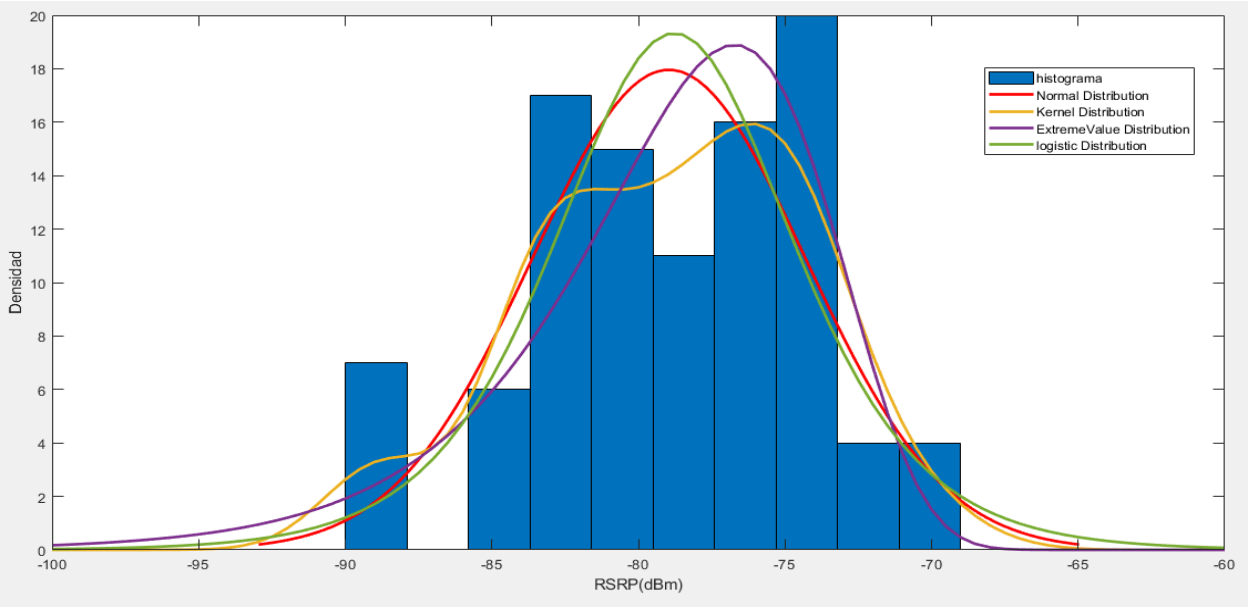


Figura 36 Distribución de probabilidad para RSRP de la Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que la componente RSRQ y RSSI tiene unas concentraciones de datos en puntos específicos dada la estabilidad de las señales durante su muestreo, se puede evidenciar que la función Kernel con estos tipos de valores tienen un mejor comportamiento. Para la componente RSRP se observa una distribución de datos más uniforme, aunque se observa una pequeña concentración de datos aislados lo cual permite que Kernel se pueda aproximar más gráficamente a ella.

6.5.4 Ruta 4

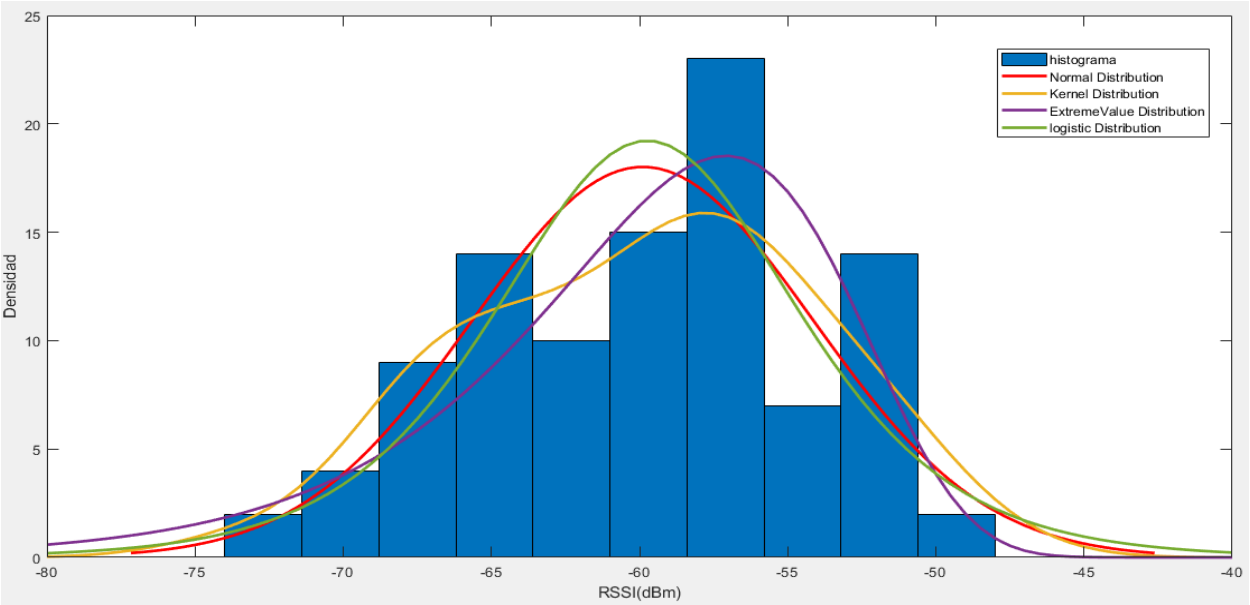


Figura 37 Distribución de probabilidad para RSSI de la Ruta 4. Fuente: Elaboración Propia

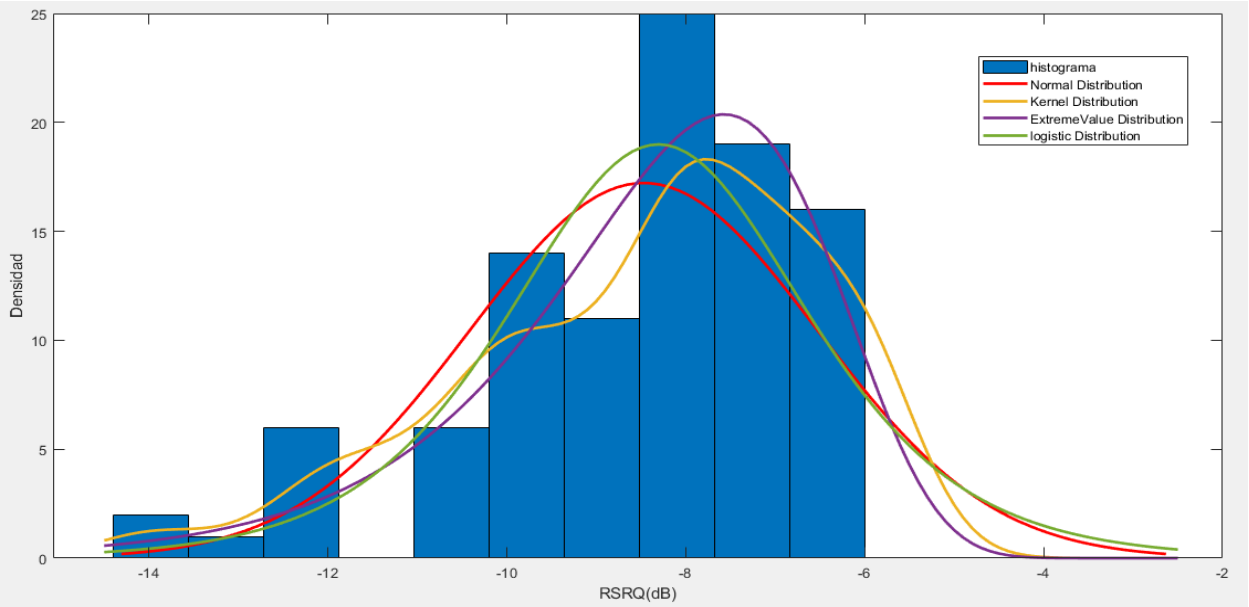


Figura 38 Distribución de probabilidad para RSRQ de la Ruta 4. Fuente: Elaboración Propia

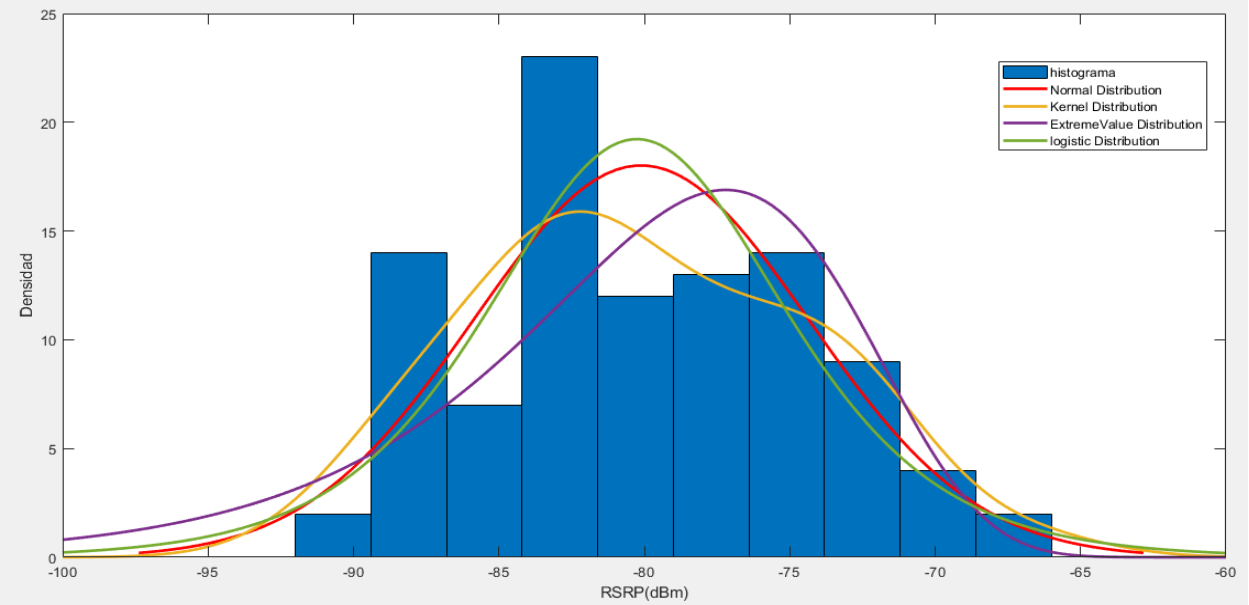


Figura 39 Distribución de probabilidad para RSRP de la Ruta 4. Fuente: Elaboración Propia

Para las componentes RSRQ, RSSI y RSRP se observa una distribución de datos uniforme lo cual permite que las gráficas de densidad se acoplen a la forma de los datos y las gráficas sean significativamente más cercanas entre sí.

6.5.5 Ruta 5

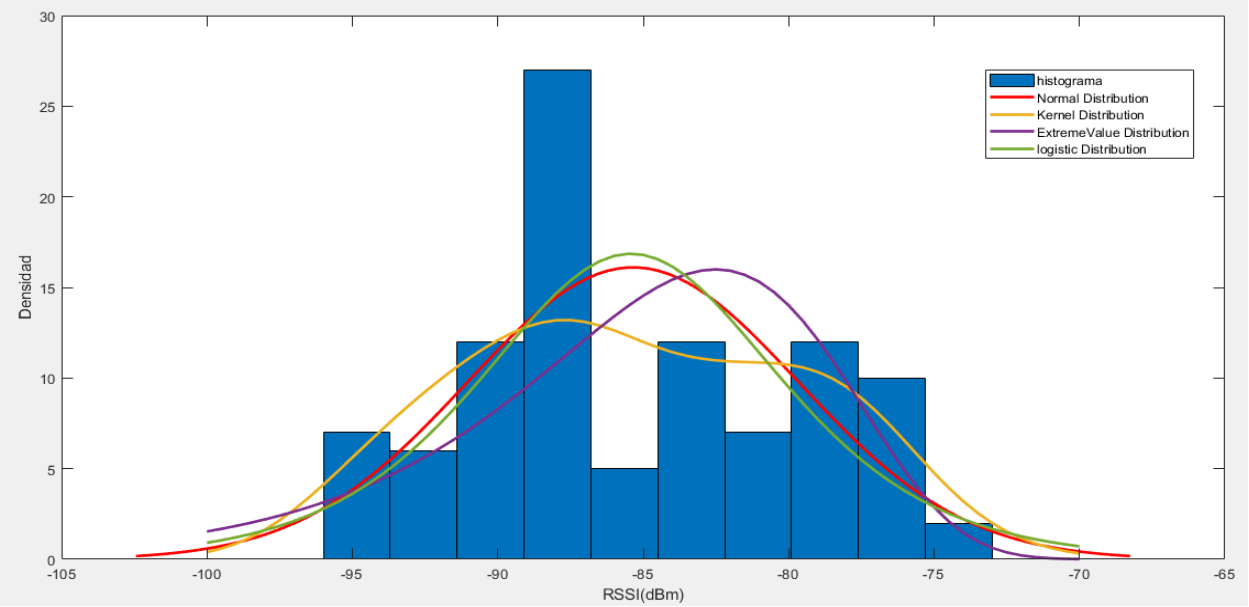


Figura 40 Distribución de probabilidad para RSSI de la Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia

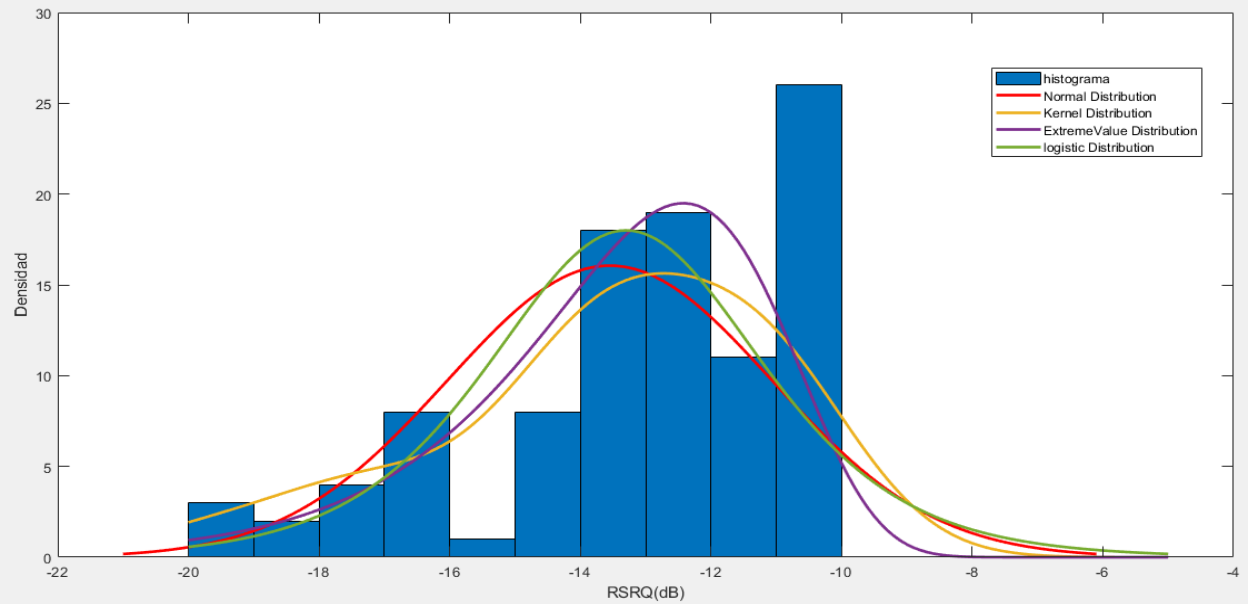


Figura 41 Distribución de probabilidad para RSRQ de la Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia

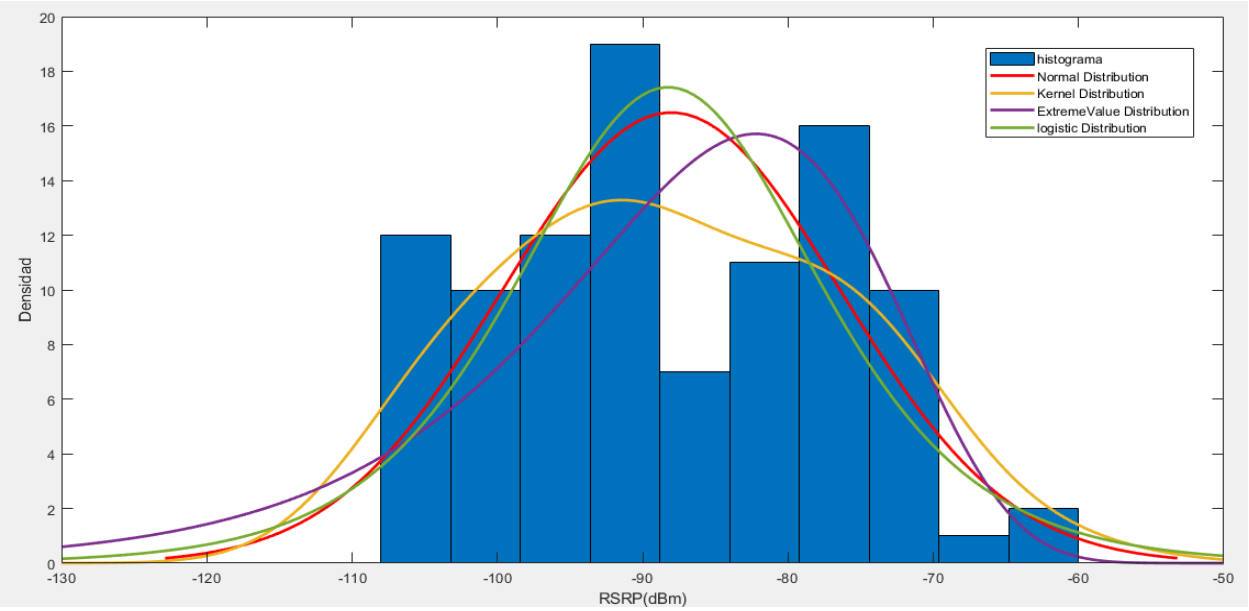


Figura 42 Distribución de probabilidad para RSRP de la Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que la componente RSSI y RSRQ tiene concentraciones de datos en puntos específicos, aunque presenta uniformidad en la mayoría de los datos, por lo tanto, se evidencia que la función Kernel con estos tipos de valores tienen un mejor comportamiento. En la componente RSRP se cuenta con una uniformidad de los datos lo cual permite que se adapte más fácilmente a las gráficas de densidad.

Al realizar un análisis más detallado se observa que la función que mejor se adapta es Kernel, la cual puede ofrecer una representación visual más adecuada de la forma en que se distribuyen los datos en el histograma. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las funciones de densidad de probabilidad son aproximaciones y no es adecuado comparar gráficamente un histograma con las gráficas de funciones de densidad, ya que estas últimas representan funciones probabilísticas continuas y el histograma es una representación discreta de los valores. Por lo tanto, se realiza a continuación un análisis de densidad de probabilidad con el cual se obtienen resultados estadísticos más apropiados y significativos.

6.6 Método Análisis de Varianza

Con el fin de validar el análisis estadístico realizado a partir de las funciones de densidad de probabilidad realizadas a los datos, se decidió realizar un análisis ANOVA, el cual permite comparar los datos reales vs los datos obtenidos de las distribuciones y aplicando el test de tukey (tabla 9) para corroborar cuál distribución es la más significativamente similar a los datos reales.

gl		número de grupos													
error	α	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	.05	17.97	36.98	32.82	37.08	40.41	43.12	45.40	47.36	49.07	50.6	52.0	53.2	54.3	55.4
	.01	90.03	135.0	164.3	185.6	202.2	215.8	227.2	237.0	245.6	253	260	266	272	277
2	.05	6.085	8.331	9.798	10.880	11.732	12.436	13.026	13.539	13.989	14.392	14.746	15.071	15.370	15.646
	.01	14.04	19.02	22.29	24.720	26.63	28.20	29.53	30.68	31.69	32.59	33.44	34.11	34.82	35.39
3	.05	4.501	5.910	6.825	7.502	8.037	8.478	8.853	9.177	9.462	9.714	9.941	10.149	10.340	10.516
	.01	8.261	10.62	12.17	13.33	14.24	15.00	15.64	16.20	16.69	17.13	17.51	17.86	18.19	18.51
4	.05	3.927	5.040	**5.757**	6.287	6.707	7.053	7.347	7.602	7.826	8.026	8.208	8.371	8.522	8.662
	.01	6.512	8.120	9.173	9.958	10.584	11.097	11.542	11.928	12.268	12.579	12.837	13.082	13.314	13.527
5	.05	3.635	4.602	5.218	5.673	6.033	6.330	6.582	6.802	6.995	7.167	7.322	7.464	7.594	7.715
	.01	5.702	6.976	7.804	8.421	8.913	9.321	9.669	9.972	10.242	10.487	10.694	10.892	11.074	11.242
6	.05	3.461	4.339	4.896	5.305	5.628	5.895	6.122	6.319	6.493	6.648	6.788	6.915	7.033	7.142
	.01	5.243	6.331	7.033	7.556	7.973	8.318	8.613	8.869	9.097	9.307	9.481	9.650	9.805	9.948
7	.05	3.344	4.165	4.681	5.060	5.359	5.606	5.815	5.998	6.158	6.301	6.431	6.549	6.657	6.757
	.01	4.949	5.919	6.543	7.005	7.373	7.679	7.939	8.166	8.368	8.552	8.707	8.856	8.994	9.121
8	.05	3.261	4.041	4.529	4.886	5.167	5.399	5.597	5.767	5.918	6.053	6.175	6.286	6.388	6.482
	.01	4.746	5.635	6.204	6.625	6.960	7.237	7.474	7.681	7.863	8.030	8.172	8.308	8.432	8.548
9	.05	3.199	3.949	4.415	4.756	5.024	5.244	5.432	5.595	5.739	5.866	5.983	6.088	6.185	6.275
	.01	4.596	5.428	5.957	6.348	6.658	6.915	7.134	7.325	7.495	7.648	7.781	7.906	8.021	8.129
10	.05	3.151	3.877	4.327	4.654	4.912	5.124	5.305	5.461	5.599	5.721	5.833	5.934	6.027	6.114
	.01	4.482	5.270	5.769	6.136	6.428	6.669	6.875	7.055	7.213	7.357	7.482	7.599	7.708	7.809
11	.05	3.113	3.820	4.256	4.574	4.823	5.028	5.202	5.353	5.487	5.605	5.713	5.811	5.901	5.984
	.01	4.392	5.146	5.621	5.970	6.247	6.476	6.672	6.842	6.992	7.129	7.247	7.359	7.461	7.557
12	.05	3.082	3.773	4.199	4.508	4.751	4.950	5.119	5.265	5.395	5.510	5.614	5.710	5.797	5.877
	.01	4.320	5.046	5.502	5.836	6.101	6.321	6.507	6.670	6.814	6.944	7.057	7.164	7.262	7.354
13	.05	3.055	3.735	4.151	4.453	4.690	4.885	5.049	5.192	5.318	5.431	5.532	5.625	5.710	5.789
	.01	4.260	4.964	5.404	5.727	5.981	6.192	6.372	6.528	6.667	6.791	6.901	7.004	7.098	7.185
14	.05	3.033	3.702	4.111	4.407	4.639	4.829	4.990	5.131	5.254	5.363	5.463	5.553	5.637	5.713
	.01	4.210	4.895	5.322	5.634	5.881	6.085	6.258	6.409	6.543	6.664	6.770	6.869	6.960	7.044
15	.05	3.014	3.674	4.076	4.367	4.595	4.782	4.940	5.077	5.198	5.306	5.403	5.492	5.574	5.649
	.01	4.168	4.836	5.252	5.556	5.796	5.994	6.162	6.309	6.439	6.555	6.658	6.754	6.843	6.925
16	.05	2.998	3.649	4.046	4.333	4.557	4.741	4.897	5.031	5.150	5.256	5.351	5.439	5.519	5.593
	.01	4.131	4.786	5.192	5.489	5.722	5.915	6.079	6.222	6.348	6.462	6.563	6.655	6.742	6.821
17	.05	2.984	3.628	4.020	4.303	4.524	4.705	4.858	4.991	5.108	5.212	5.306	5.392	5.471	5.544
	.01	4.099	4.742	5.140	5.430	5.659	5.847	6.007	6.147	6.270	6.381	6.480	6.570	6.654	6.732
18	.05	2.971	3.609	3.997	4.277	4.495	4.673	4.824	4.956	5.071	5.173	5.266	5.351	5.428	5.500
	.01	4.071	4.703	5.094	5.379	5.603	5.788	5.944	6.081	6.201	6.310	6.406	6.494	6.577	6.653
19	.05	2.960	3.593	3.977	4.253	4.469	4.645	4.794	4.924	5.038	5.139	5.230	5.314	5.391	5.462
	.01	4.046	4.670	5.054	5.334	5.554	5.735	5.889	6.022	6.141	6.247	6.341	6.428	6.508	6.583
20	.05	2.950	3.578	3.958	4.232	4.445	4.620	4.768	4.896	5.008	5.108	5.199	5.281	5.357	5.427
	.01	4.024	4.639	5.018	5.294	5.510	5.688	5.839	5.970	6.087	6.190	6.284	6.368	6.447	6.521
24	.05	2.919	3.532	3.901	4.166	4.373	4.541	4.684	4.807	4.915	5.011	5.099	5.178	5.251	5.318
	.01	3.956	4.546	4.907	5.168	5.374	5.542	5.685	5.809	5.919	6.017	6.105	6.186	6.259	6.328
30	.05	2.888	3.486	3.845	4.102	4.302	4.464	4.602	4.720	4.824	4.917	5.000	5.077	5.146	5.211
	.01	3.889	4.455	4.799	5.048	5.242	5.401	5.536	5.653	5.756	5.848	5.931	6.007	6.077	6.141
40	.05	2.858	3.442	3.791	4.039	4.232	4.389	4.521	4.635	4.735	4.824	4.904	4.976	5.043	5.105
	.01	3.825	4.367	4.696	4.931	5.114	5.265	5.392	5.502	5.599	5.685	5.763	5.835	5.900	5.960
60	.05	2.829	3.399	3.737	3.977	4.163	4.314	4.441	4.550	4.646	4.731	4.808	4.878	4.942	5.001
	.01	3.762	4.282	4.595	4.818	4.991	5.133	5.253	5.356	5.447	5.527	5.600	5.667	5.728	5.785
80	.05	2.814	3.377	3.711	3.947	4.129	4.277	4.401	4.509	4.603	4.686	4.761	4.829	4.892	4.949
	.01	3.732	4.241	4.545	4.763	4.932	5.069	5.183	5.283	5.371	5.450	5.521	5.585	5.644	5.699
100	.05	2.806	3.364	3.695	3.929	4.109	4.255	4.378	4.484	4.577	4.659	4.733	4.800	4.862	4.918
	.01	3.714	4.216	4.516	4.730	4.896	5.031	5.143	5.241	5.328	5.404	5.474	5.536	5.594	5.647
120	.05	2.800	3.356	3.684	3.917	4.096	4.241	4.363	4.467	4.559	4.641	4.714	4.781	4.842	4.898
	.01	3.702	4.200	4.497	4.709	4.872	5.005	5.118	5.214	5.299	5.374	5.442	5.504	5.561	5.613
10^3	.05	2.771	3.313	3.632	3.857	4.029	4.169	4.285	4.386	4.473	4.551	4.621	4.684	4.742	4.795
	.01	3.638	4.116	4.399	4.599	4.753	4.879	4.984	5.074	5.153	5.223	5.287	5.344	5.397	5.445
∞	.05	2.772	3.314	3.633	3.858	4.030	4.170	4.286	4.387	4.474	4.552	4.622	4.685	4.743	4.796
	.01	3.643	4.120	4.403	4.603	4.757	4.882	4.987	5.078	5.157	5.227	5.291	5.348	5.401	5.449

Tabla 9 Comparaciones múltiples del test de Tukey. (Cajal, 2022).

El análisis ANOVA se compone de una serie de pasos.
En primer lugar, se escogen los grupos de datos a comparar, en este caso son los valores reales con respecto a los valores específicos de cada una de las distribuciones obtenidas.

A partir de la distribución de los valores medidos se hallan los datos de la columna valor real (%) y las columnas de las funciones Kernel, Logístico, Valor extremo y Normal se calculan aplicando rangos más específicos a cada uno de los valores reales.

Posteriormente, se genera un análisis de varianza de un factor utilizando el software Excel, tomando los valores ya definidos, para cada potencia en cada una de las 5 BTS; es decir, se realiza uno por cada tipo de potencia como se muestra en la tabla 10.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	***Suma de cuadrados***	***Grados de libertad***	***Promedio de los cuadrados***	***F***	***Probabilidad***	***Valor crítico para F***
Entre grupos	0,01368802	4	0,003422005	0,82809896	0,51254486	2,525215102
Dentro de los grupos	0,247941752	60	0,004132363			
Total	0,261629772	64				

Tabla 10 Análisis de Varianza de un factor 1. Fuente: Elaboración Propia

Se evidencias que para todos los análisis de varianza la hipótesis nula es aceptada lo cual indica que los grupos analizados son similares entre sí y para tener en evidencia cuál es la función densidad más significativa a los valores reales se realiza el método tukey y se obtiene la (HSD). Aplicando la Fórmula 7 de Diferencia Honestamente Significativa.

Finalmente se realiza la comparación de promedios de los datos presentados en la (Tablas 11), presentada a continuación:

DISTRIBUCIÓN MÁS SIGNIFICATIVA					
	HSD (0,070906022)	**Valores Función 1**	**Valores Función 2**	**Valores Función 3**	**Valores Función 4**
Componente X	**Valor Reales**	0,03631765	0,0324	0,03835451	0,02717445

Tabla 11 Tabla comparativa de distribución más significativa de funciones respecto a valores reales. Fuente: Elaboración Propia

Donde se puede evidenciar los datos de las 4 distribuciones se encuentran en la región de aceptación por lo tanto se acepta confirma la aceptación de la hipótesis Nula lo cual indica que las funciones y los valores reales son similares entre sí, en este caso en puntual se puede observar que la distribución normal es la más significativa a los datos reales.

7. Resultados

Para el análisis de resultados, se evalúa la precisión de las gráficas en comparación con las mediciones reales. Esto implica calcular la probabilidad de ocurrencia de un evento específico mediante la evaluación de la integral definida entre dos puntos, Se utilizan las tablas 4 y 5 como referencia para evaluar los datos en los rangos de calidad, para el desarrollo de este análisis se opta por el uso del software Geogebra para calcular el área bajo la curva de las diferentes distribuciones en estos resultados, esto debido a que con su interfaz gráfica resulta más práctico variar entre los rangos a evaluar como se muestra en la Figura 43.

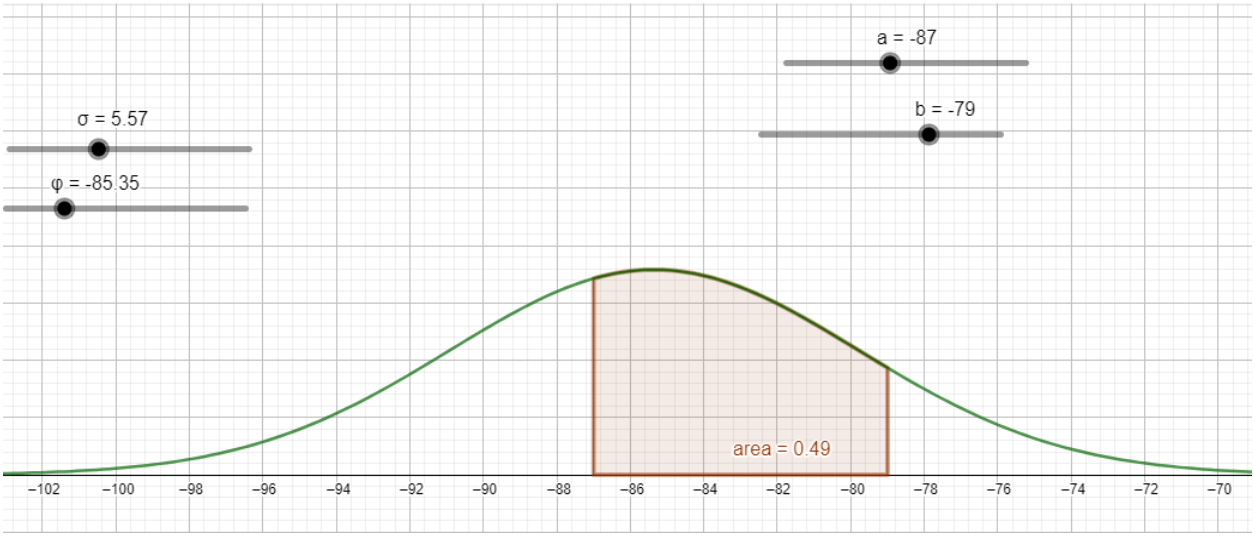


Figura 43 Porcentaje del área bajo la curva distribución normal. Fuente: Elaboración Propia

7.1 Análisis Estadístico de las Funciones de Densidad de Probabilidad

Se evalúan las componentes de cada una de las rutas tomando como referencia los rangos propuestos. A partir de estos valores se realiza una tabla comparativa con los datos obtenidos mediante las funciones de densidad de probabilidad y los datos reales. Los resultados de esta comparación se muestran en las Tablas 12 al 16, desarrolladas en el software Excel. Es importante mencionar que el valor "1" corresponde al 100% de probabilidad de ocurrencia, mientras que el valor "0" indica el 0% de la misma.

RSSI(dBm)		NORMAL	KERNEL	LOGÍSTICO	VALOR EXTREMO	MEDIDO
EXCELENTE	**>=-65**	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00
BUENO	**-65 A -75**	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
REGULAR	**-75 A -85**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MALO	**<=-85**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSRP(dBm)		**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**	**MEDIDO**
EXCELENTE	**>=-80**	0,19	0,20	0,29	0,16	0,18
BUENO	**-80 A -90**	0,50	0,49	0,33	0,59	0,53
REGULAR	**-90 A -100**	0,28	0,24	0,25	0,20	0,26
MALO	**<=-100**	0,03	0,06	0,14	0,04	0,04
RSRQ(dB)		**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**	**MEDIDO**
EXCELENTE	**>=10**	0,15	0,19	0,26	0,14	0,24
BUENO	**-10 A -15**	0,71	0,63	0,48	0,71	0,65
REGULAR	**-15 A -20**	0,15	0,18	0,22	0,14	0,11
MALO	**<-20**	0,00	0,01	0,04	0,01	0,00

Tabla 12 Probabilidad de nivel de señal Ruta 1. Fuente: Elaboración Propia

RSSI(dBm)		NORMAL	KERNEL	LOGÍSTICO	VALOR EXTREMO	MEDIDO
EXCELENTE	**>=-65**	0,26	0,30	0,34	0,15	0,31
BUENO	**-65 A -75**	0,27	0,22	0,17	0,24	0,28
REGULAR	**-75 A -85**	0,25	0,22	0,17	0,24	0,21
MALO	**<=-85**	0,22	0,26	0,31	0,36	0,20
RSRP(dBm)		**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**	**MEDIDO**
EXCELENTE	**>=-80**	0,42	0,42	0,32	0,48	0,44
BUENO	**-80 A -90**	0,29	0,26	0,32	0,24	0,27
REGULAR	**-90 A -100**	0,20	0,21	0,23	0,14	0,22
MALO	**<=-100**	0,10	0,11	0,13	0,14	0,07
RSRQ(dB)		**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**	**MEDIDO**
EXCELENTE	**>=10**	0,49	0,49	0,49	0,55	0,57
BUENO	**-10 A -15**	0,48	0,46	0,37	0,38	0,39
REGULAR	**-15 A -20**	0,03	0,05	0,11	0,06	0,04
MALO	**<-20**	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00

Tabla 13 Probabilidad de nivel de señal Ruta 2. Fuente: Elaboración Propia

RSSI (dBm)		NORMAL	KERNEL	LOGÍSTICO	VALOR EXTREMO	MEDIDO
EXCELENTE	**>=-65**	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
BUENO	**-65 A -75**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
REGULAR	**-75 A -85**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MALO	**<=-85**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSRP(dBm)		**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**	**MEDIDO RUTA 3**
EXCELENTE	**>=-80**	0,59	0,59	0,56	0,45	0,63
BUENO	**-80 A -90**	0,40	0,39	0,35	0,46	0,37
REGULAR	**-90 A -100**	0,01	0,02	0,07	0,08	0,00
MALO	**<=-100**	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
RSRQ(dB)		**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**	**MEDIDO**
EXCELENTE	**>=10**	0,79	0,80	0,69	0,64	0,91
BUENO	**-10 A -15**	0,21	0,20	0,29	0,34	0,09
REGULAR	**-15 A -20**	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
MALO	**<-20**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 14 Probabilidad de nivel de señal Ruta 3. Fuente: Elaboración Propia

RSSI(dBm)		NORMAL	KERNEL	LOGÍSTICO	VALOR EXTREMO	MEDIDO
EXCELENTE	**>=-65**	0,81	0,77	0,71	0,66	0,80
BUENO	**-65 A -75**	0,18	0,22	0,22	0,27	0,20
REGULAR	**-75 A -85**	0,01	0,01	0,06	0,06	0,00
MALO	**<=-85**	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
RSRP(dBm)		**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**	**MEDIDO**
EXCELENTE	**>=-80**	0,49	0,47	0,50	0,36	0,49
BUENO	**-80 A -90**	0,46	0,48	0,35	0,47	0,49
REGULAR	**-90 A -100**	0,04	0,05	0,12	0,13	0,20
MALO	**<=-100**	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00
RSRQ(dB)		**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**	**MEDIDO**
EXCELENTE	**>=10**	0,78	0,78	0,69	0,88	0,85
BUENO	**-10 A -15**	0,22	0,22	0,28	0,11	0,15
REGULAR	**-15 A -20**	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00
MALO	**<-20**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 15 Probabilidad de nivel de señal Ruta 4. Fuente: Elaboración Propia

RSSI(dBm)		NORMAL	KERNEL	LOGÍSTICO	VALOR EXTREMO	MEDIDO
EXCELENTE	**>=-65**	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
BUENO	**-65 A -75**	0,03	0,03	0,11	0,00	0,02
REGULAR	**-75 A -85**	0,44	0,44	0,33	0,34	0,46
MALO	**<=-85**	0,52	0,53	0,52	0,65	0,52
RSRP(dBm)		**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**	**MEDIDO**
EXCELENTE	**>=-80**	0,24	0,28	0,33	0,14	0,30
BUENO	**-80 A -90**	0,32	0,25	0,21	0,29	0,26
REGULAR	**-90 A -100**	0,28	0,26	0,19	0,27	0,26
MALO	**<=-100**	0,15	0,19	0,26	0,30	0,18
RSRQ(dB)		**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**	**MEDIDO**
EXCELENTE	**>=10**	0,08	0,08	0,19	0,02	0,04
BUENO	**-10 A -15**	0,64	0,66	0,45	0,56	0,78
REGULAR	**-15 A -20**	0,28	0,24	0,29	0,36	0,18
MALO	**<-20**	0,00	0,00	0,07	0,07	0,00

Tabla 16 Probabilidad de nivel de señal Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia

Para la componente RSSI de la ruta 1 y 3 se observa que durante la toma de datos los niveles de la señal son constantes y se ubican en el rango de excelencia por lo cual las 4 gráficas de densidad se asemejan a los valores reales, en las componentes RSRQ y RSRP se ve una distribución más equilibrada de datos y se puede evidenciar diferencias significativas respecto a las funciones.

Se observa un comportamiento distribuido en todos los rangos de calidad de señal en las tres componentes RSRP, RSSI y RSRQ para las rutas 2, 4 y 5. Además se encuentran diferencias significativas en la probabilidad de ocurrencia de los datos en cada una de las funciones, lo cual permite identificar tendencias y errores significativos en los resultados obtenidos.

A continuación, se calcula el error absoluto generado a partir de las gráficas en relación con el valor medido, buscando determinar qué porcentaje de error es menor en función de las gráficas de densidad. Para este propósito, se tabulan todos los errores para cada una de las rutas con el fin de determinar la mejor gráfica en relación a los datos reales, en la siguiente tabla se muestra un ejemplo de ello para la ruta 5 (Tabla 17).

RSSI	NORMAL	KERNEL	LOGÍSTICO	VALOR EXTREMO
ERROR	0,0%	0,0%	2,7%	0,0%
	1,4%	1,0%	9,3%	2,0%
	1,9%	2,0%	12,5%	12,0%
	0,4%	1,0%	0,5%	13,0%
PROMEDIO	0,9%	1,0%	6,2%	6,8%

RSRP	**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**
ERROR	6,0%	2,0%	3,3%	16,0%
	6,0%	1,0%	5,1%	3,0%
	2,0%	0,0%	6,5%	1,0%
	3,0%	1,0%	8,3%	12,0%
PROMEDIO	4,3%	1,0%	5,8%	8,0%
RSRQ	**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**
ERROR	3,7%	4,0%	14,9%	2,0%
	13,7%	12,0%	33,1%	22,0%
	9,5%	6,0%	10,9%	18,0%
	0,5%	0,1%	6,8%	7,0%
PROMEDIO	7%	6%	16%	12%

Tabla 17 Error Absoluto de probabilidad Ruta 5. Fuente: Elaboración Propia

En este caso puntual se puede identificar cual es la función con el promedio de error absoluto más bajo para cada una de las potencias de la ruta 5 comparado con las medidas tomadas, como es el caso de la distribución normal para la componente RSSI

Posteriormente se generan las tablas de error para las cuatro rutas restantes y se organizan los datos para determinar qué distribución es mejor según las señales evaluadas. De esta forma, se obtienen los datos para cada una de las componentes como se muestra en las tablas de la 18-20.

RSSI	**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**
RUTA 1	0,00%	0,00%	0,50%	0,50%
RUTA 2	3,01%	3,50%	7,54%	9,75%
RUTA 3	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
RUTA 4	0,84%	1,25%	4,58%	7,00%
RUTA 5	0,95%	1,00%	6,24%	6,75%
PROMEDIO	1,0%	1,2%	3,8%	4,8%

Tabla 18 Tabla de error promedio para la componente RSSI. Fuente: Elaboración Propia

RSRP	**NORMAL**	**KERNEL**	**LOGÍSTICO**	**VALOR EXTREMO**
RUTA 1	1,81%	2,50%	10,62%	3,50%
RUTA 2	2,34%	2,00%	6,00%	5,50%
RUTA 3	2,09%	2,00%	4,51%	9,00%
RUTA 4	4,63%	4,50%	6,29%	6,25%
RUTA 5	4,25%	1,00%	5,79%	8,00%
PROMEDIO	3,0%	2,4%	6,6%	6,5%

Tabla 19 Tabla de error promedio para la componente RSRP. Fuente: Elaboración Propia

RSRQ	NORMAL	KERNEL	LOGÍSTICO	VALOR EXTREMO
RUTA 1	4,66%	3,75%	8,34%	5,00%
RUTA 2	4,50%	4,00%	4,66%	1,50%
RUTA 3	5,78%	5,50%	10,74%	13,25%
RUTA 4	3,39%	3,50%	8,15%	2,00%
RUTA 5	6,85%	5,53%	16,43%	12,25%
PROMEDIO	5,0%	4,5%	9,7%	6,8%

Tabla 20 Tabla de error promedio para la componente RSRQ. Fuente: Elaboración Propia

Para la componente RSSI de todas las rutas se observa que la gráfica de densidad normal tiene un promedio de error absoluto inferior en comparación de las demás funciones, sin embargo, la diferencia significativa con la función de densidad Kernel es de tan solo 0.2% por lo que podría considerarse como una alternativa a la función normal.

Al analizar la componente RSRP, se observó que la gráfica de la función kernel presenta el menor porcentaje de error absoluto. Este hallazgo coincide con el análisis gráfico de las probabilidades de densidad, donde la función kernel mostró una mejor capacidad de ajuste a la agrupación de valores atípicos en concordancia con el histograma de datos. La función de densidad normal es una alternativa viable en este caso, con una diferencia de solo el 0,6% en comparación con el kernel.

Por último, en cuanto al componente RSRQ, se llega a la conclusión de que, en promedio, la función kernel presenta un menor porcentaje de error en todas las rutas evaluadas. Cabe destacar que para las rutas 2 y 4 la función de valor extremo entrega el menor error absoluto debido a la distribución de los datos, la cual podría ser útil en casos específicos. Sin embargo, en promedio, la distribución de densidad normal es mejor que la función de valor extremo, con una diferencia de solo 0,5% en comparación con la función kernel, mucho menor que el 2,3% de la función de valor extremo.

7.2 Análisis de Varianza

Para el análisis de varianza (ANOVA) se obtienen las siguientes dos hipótesis, nula (H0) o alternativa (H1):

- Hipótesis nula (H0): No existe diferencia significativa entre los datos medidos y los datos generados a partir de la función de densidad.

- Hipótesis alternativa (H1): Existe una diferencia significativa entre los datos medidos y los datos generados a partir de la función de densidad.

A Continuación se muestran los resultados del análisis en la tablas de las 21 a 23 , para cada una de las BTS por cada potencia.

Donde se puede evidenciar el valor Crítico, el Valor crítico cálculo y la Diferencia Honestamente Significativa (HSD) para validar que los grupos de datos se encuentren en la región de aceptación

y también validar en caso de que no con el (HSD) cuáles datos son los más significativamente diferentes entre sí.

RSSI	Valor Crítico F	F	HSD	NORMAL	KERNEL	LOGÍSTICO	VALOR EXTREMO
RUTA 1	2,5252151	0,76888861	6,94%	2,72%	3,24%	3,84%	3,63%
RUTA 2	2,44723651	20,2511513	0,97%	2,21%	2,62%	2,62%	2,39%
RUTA 3	2,75871047	0,46692194	20,86%	5,64%	8,45%	7,90%	7,63%
RUTA 4	2,45057052	0,86361915	1,59%	0,25%	0,31%	0,99%	0,58%
RUTA 5	2,5252151	5,51870836	3,11%	3,86%	3,92%	4,51%	3,99%
PROMEDIO				2,94%	3,71%	3,97%	3,64%

Tabla 21 Análisis ANOVA, potencia RSSI, para cada una de las BTS. Fuente: Elaboración propia

RSRP	Valor Crítico F	F	HSD	NORMAL	KERNEL	LOGÍSTICO	VALOR EXTREMO
RUTA 1	2,43873922	1,03141067	1,52%	0,29%	0,21%	0,99%	0,71%
RUTA 2	2,41176806	4,18391977	0,49%	0,31%	0,37%	0,72%	0,44%
RUTA 3	2,48588494	1,01351261	2,67%	0,91%	0,92%	1,89%	1,20%
RUTA 4	2,45057052	0,78936783	1,62%	0,25%	0,44%	0,99%	0,52%
RUTA 5	2,41918723	4,08390443	0,60%	0,49%	0,55%	2,01%	1,62%
PROMEDIO				0,45%	0,50%	1,32%	0,90%

Tabla 22 Análisis ANOVA, potencia RSRP, para cada una de las BTS. Fuente: Elaboración propia.

RSRQ	Valor Crítico F	F	HSD	NORMAL	KERNEL	LOGÍSTICO	VALOR EXTREMO
RUTA 1	2,53968863	0,15653882	5,91%	2,72%	3,24%	3,84%	3,63%
RUTA 2	2,5130401	0,11820907	5,23%	0,13%	0,26%	1,05%	0,81%
RUTA 3	2,60597495	0,02090719	12,28%	0,03%	0,11%	1,01%	0,59%
RUTA 4	2,60597495	0,21677908	9,29%	0,72%	0,59%	2,46%	2,17%
RUTA 5	2,55717915	0,26353452	6,53%	0,37%	0,45%	0,87%	0,55%
PROMEDIO				0,79%	0,93%	1,84%	1,55%

Tabla 23 Análisis ANOVA, potencia RSRQ, para cada una de las BTS. Fuente: Elaboración propia

Para la componente RSRQ se evidencia que se cumple la hipótesis nula lo cual demuestra que las funciones de densidad de probabilidad, son significativamente similares entre sí a la

distribución de datos medidos en la totalidad de las rutas, de igual modo se cumple la hipótesis para las componentes RSSI y RSRP en las rutas 1, 3 y 4.

Además, se evidencia que las componentes RSSI y RSRP para las rutas 2 y 5 cumplen la hipótesis alternativa, esto a partir de que los datos medidos son dispersos y no tienen continuidad, lo que genera imprecisiones al momento de realizar la comparación de las funciones respecto los datos medidos.

Finalmente, para las componentes RSSI, RSRP y RSRQ en cada una de las BTS la función Normal es la más significativa en promedio con respecto a los valores medidos. Cabe destacar que la distribución Kernel es muy cercana a la Normal por lo tanto también es posible considerarla para el desarrollo de análisis posteriores.

8. Conclusiones y Recomendaciones

El uso de gráficas de densidad de probabilidad es una herramienta útil para analizar el comportamiento probabilístico de una señal 4G. A partir de estas gráficas, se puede obtener información sobre la distribución de los valores de la señal, lo que ayuda a detectar patrones o tendencias en los datos, en este caso se evidencio que las gráficas de funciones para las rutas 1,3 y 4 fueron significativamente similares a los datos reales, lo cual permite desarrollar modelos probabilísticos para estos datos.

De igual forma, al analizar el comportamiento de una red, las gráficas de densidad son una herramienta útil para obtener una visión general del comportamiento de los datos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la elección de la gráfica de densidad adecuada para el análisis es crucial; ya que, si la gráfica de densidad utilizada no es adecuada para los datos que se están evaluando, los resultados obtenidos podrían llevar a imprecisiones. Por lo tanto, se recomienda utilizar la función de densidad que tenga el mejor ajuste respecto a datos que se están evaluando para obtener una visión más precisa del comportamiento de los mismo, en este caso se eligieron la funciones Kernel, Logístico, Normal y valor extremo debido a su capacidad para incluir valores negativos lo que permitió llegar a la identificación de patrones y tendencias útiles para el el análisis estadístico más preciso.

Basándose en los resultados obtenidos del análisis realizado en este proyecto, se puede concluir que la Función de Densidad de Kernel es una función útil para evaluar el comportamiento de los casos, donde se encuentren agrupaciones de datos lejanos a la media gracias a su capacidad de suavizar estos en su gráfica. Sin embargo, se recomienda el uso de la gráfica de Densidad Normal debido a que se concluyó durante el análisis anova que para las componentes RSSI, RSRP y RSRQ en cada una de las rutas la distribución Normal es la más significativa en promedio con respecto a los valores medidos.

En el análisis realizado sobre el error absoluto a partir de los gráficos de densidad se puede evidenciar que para las componentes RSSI, RSRP y RSRQ tanto las gráficas de densidad normal y Kernel presentan el promedio de error absoluto más bajo para todas las gráficas, esto debido a su capacidad para ser utilizadas de manera más general en diferentes situaciones y con diferentes conjuntos de datos. Sin embargo, las gráficas de distribución logísticas y de valor extremo pueden ser muy útiles en conjuntos de datos específicos, como se pudo evidenciar en el análisis de los datos de la componente RSRQ en la ruta 2 y 4.

Además, se puede concluir que la señal experimenta una atenuación normal a medida que se aleja de la estación base (BTS), esta se puede observar en las rutas 1 y 3 en donde la caída de potencia se da en las componentes RSRP y RSRQ mientras la componente RSSI mantiene una buena intensidad dado a su línea directa de visión a la antena. Esta atenuación se observa de manera más significativa en los casos donde no hay campo de visión directo entre el dispositivo y la BTS como pasa en las rutas 2, 4 y 5 deteriorando las componentes de manera considerable.

El análisis muestra que para las componentes RSSI y RSRP en las rutas 2 y 5 se cumple la hipótesis alternativa, esto a partir de que los datos medidos son dispersos y no tienen continuidad, lo que genera imprecisiones al momento de realizar la comparación de las funciones respecto los datos medidos. Por lo tanto si se quiere aumentar la certeza del análisis de varianza recomienda aumentar el número de datos, lo cual en este caso aumentaría la probabilidad de cumplir la hipótesis nula. Además, una muestra más grande puede proporcionar una representación más precisa del comportamiento general de la señal 4G, lo que disminuiría la probabilidad de que los resultados sean un efecto del azar o una variación aleatoria.

9. Referencias

Agusti Comes, R. (Ed.). (2010). LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. Fundación Vodafone España. https://proyectolte.files.wordpress.com/2012/09/lte-nuevas-tendencias.pdf

Alonso Quintana, R. Bordón López, R. Montejo Sánchez, S. (2013). Estudio comparativo de los modelos de propagación de canal inalámbrico. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, *34*(1), 12-26. https://doi.org/10.1234/rielac.v34i1.150

Arimas. (s.f.). RSRP and RSRQ Measurement in LTE. RSRP and RSRQ Measurement in LTE - arimas. https://arimas.com/2016/04/04/78-rsrp-and-rsrq-measurement-in-lte

Blanco Castañeda, L. (2010). Probabilidad. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Solano, H. L. (2018). Introducción a la teoría de la probabilidad (1st ed.). Editorial Universidad del Norte. Archivo Digital .https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/handle/123456789/10716

CableFree. (s.f.) LTE RSSI, RSRP and RSRQ Measurement. LTE RSSI, RSRP and RSRQ Measurement – CableFree. https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/rsrp-rsrq-measurement-lte/

Cajal, A. (15 de diciembre de 2022). *Prueba de Tukey: en qué consiste, caso de ejemplo, ejercicio resuelto.* https://www.lifeder.com/prueba-de-tukey/

Casella, G., & Berger, R. L. (2001) Statistical Inference. Archivo Digital https://mybiostats.files.wordpress.com/2015/03/casella-berger.pdf

Constain Prado, D. D. (2018). *Cobertura y capacidad en redes 2G, 3G y 4G*. [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Archivo Digital. https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/14691?show=full

Comisión de Regulación de Comunicaciones, CRC. (2019). *Redes Móviles Colombia: Análisis y hoja de ruta para su modernización.* *https://www.crcom.gov.co/system/files/Biblioteca%20Virtual/Estudio%20sobre%20Redes%20m%C3%B3viles%20en%20Colombia%3A%20an%C3%A1lisis%20y%20hoja%20de%20ruta%20regulatoria/3-documento-modernizacion-redes-moviles-1.pdf*

Dahlman, E., Parkvall, S., Sköld, J. & Beming, P. (2008) *3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband.* Academic Press.

Fernandez López, A. y González López, D. (2002). Transmisión y Redes de datos. Universidad de Huelva. http://www.uhu.es/fernando.gomez/transydat_archivos/Movil.PDF

Garg, V. K. (2002). Wireless Network Evolution 2G to 3G (1st ed.). Prentice Hall.

García Rueda, F. J. (2016). *Modelos de propagación para comunicaciones móviles 4G y 5G*. [Tesis de pregrado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación]. Archivo Digital UPM. https://oa.upm.es/44152/

Garzón Gil, J. M. (2015). *Estudio de Cobertura de la Red de LTE en la Localidad de Chapinero Bogotá de los Operadores Claro, Movistar y Tigo*. [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Archivo Digital. https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/2254

Henares-Villar, S. (2015). Estudio y medida de cobertura LTE en el centro de Úbeda. [Tesis de pregrado, Universidad de Jaén]. Archivo Digital https://tauja.ujaen.es/handle/10953.1/1887

Huidobro Moya, J. M. (2004). Manual de Telecomunicaciones. Editorial RA-MA S.A.

Huidobro Moya, J. M. (2012). Comunicaciones Móviles. Sistemas GSM, UMTS y LTE (1ª ed.) Editorial RA-MA S.A.

Huidobro Moya, J. M. y Conesa Pastor, R. (2006). Sistemas de Telefonía (5a ed.). Ediciones Paraninfo S.A.

Iglesias Quiñones, L. (2016). Planificación y optimización de una red LTE con la herramienta ATOLL. [Tesis de pregrado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona de la Universidad Politécnica de Catalunya]. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/83015/PFC%20Luis%20Iglesias.pdf

Field, A. (2018). Discovering statistics using IBM SPSS statistics (5th ed.). SAGE Publications.

Fonseca Puentes, D.F. y Marín Arias, M. A. (2018) Niveles de potencia de la radiación electromagnética percibida en las bandas LTE. [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Archivo Digital. https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/8288

Kazmeirczyk, S. (2020). Implementación de un sistema de análisis de medida de cobertura LTE mediante la herramienta QualipoC. [Trabajo de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. https://oa.upm.es/57836/

Meeus, J. (1998). Astronomical algorithms. Willmann-Bell

Stirzaker, D. (s.f.). (2003) Elementary Probability Second Edition. Archivo digital https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KITAEVA/statistics/book/Tab2/ElementaryProbabilityDavidStirzaker.pdf

López Herrera, E. (2000). El método Kernel para estimar funciones de densidad: una aplicación multivariada.

León Juárez, G. (2013). Avances tecnológicos en la telefonía celular. [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Archivo Digital https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/handle/123456789/10716

Mantilla, S.P. (2019). El sistema de comunicaciones móviles de próxima generación 5G y su caso de uso IoT. [Tesis de maestría, Universidad Oberta de Catalunya]. Archivo Digital. https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/90205/6/supermantillaTFM0119memoria.pdf

NetMonster. (s.f.) *Home*. https://netmonster.app/#

Pascual García, J., Molina García Pardo J. M. y Llácer, L. J. (2010). *Sistemas de comunicaciones móviles caracterización del canal móvil*. Universidad Politécnica de Cartagena.

Pedraza Martínez, L.F., Hernández Suárez, C.A. y Ballesteros Larrotta, D.R. (2009). Análisis experimental para un modelo de propagación de la telefonía móvil de la Universidad Militar. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, *19*(2), 45–58. https://doi.org/10.18359/rcin.289

Estadistica.net. (s.f.). Análisis de la varianza. Instrumentos estadisticos avanzados Universidad Automtonam de Madrid https://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/ANALISIS-VARIANZA/analisis-varianza.pdf

Robinson, E. A. (2013). Probability Theory and Applications. Países Bajos: Springer Netherlands.

Resolución 754 de 2016. [Agencia Nacional del Espectro]. Por la cual se reglamentan las condiciones que deben cumplir las estaciones radioeléctricas, con el objeto de controlar los niveles de exposición de las personas a los campos electromagnéticos y se dictan disposiciones relacionadas con el despliegue de antenas de radiocomunicaciones. 21 de octubre de 2016.

Rodrígez Melo, J. D., Bautista Rodríguez, J.C. y Sotomonte Peña, Y. L. (2018). Xirio: Herramienta para la planeación de redes de comunicaciones móviles celulares. [Tesis de especialización, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Archivo Digital. https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13741

Sauter, M. (2011). From GSM to LTE: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband (1st ed.). John Wiley & Sons.

Sesia, S., Toufik, I. & Baker, M. (2009). LTE-The UMTS Long Term Evolution-From theory to practice. John Wiley & Sons.

Simpson, O. & Sun, Y. (2018). Simpson, O., & Sun, Y. (2018). LTE RSRP, RSRQ, RSSNR and local topography profile data for RF propagation planning and network optimization in an urban propagation environment. *Data in brief*, *21*, 1724-1737. Archivo Digital https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.08.137

Teltonika. (s.f.). *RSRP and RSRQ*. RSRP and RSRQ – Teltonika Networks Wiki. Archivo Digital https://wiki.teltonika-networks.com/view/RSRP_and_RSRQ

Vargas Patiño, D. y Cardona Gutiérrez, J.C. (2016). Telefonía móvil: una utopía nacida con el DynaTAC 8000X. *Ventana Informática*, *34*, 25-40. Archivo Digital https://doi.org/10.30554/ventanainform.34.1706.2016

Xiaomi.co (s.f.). Especificaciones técnicas Xiaomi Redmi Note 10S 6GB/128GB. Xiaomi Redmi Note 10S 6GB/128GB – mixiaomi.co. Archivo digital https://mixiaomi.co/product/xiaomi-redmi-note-10s-6gb-128gb/

Anexos

Anexo 1 Datos recolectados

Ruta 1 - BTS 1

MUESTRA	RSRP (dBm)	RSRQ (dBm)	RSSI (dBm)	LATITUD	LONGITUD	DISTANCIA(m)
1	-100	-12	-65	4,571944	-74,090675	138,6445115
2	-99	-15	-65	4,571955	-74,090616	133,4459055
3	-102	-15	-63	4,571951	-74,090629	134,4967501
4	-95	-12	-63	4,571951	-74,090502	122,3024219
5	-98	-14	-65	4,571945	-74,090456	117,6281672
6	-100	-14	-65	4,571902	-74,090433	112,935463
7	-99	-15	-63	4,571855	-74,090378	105,0204543
8	-99	-17	-61	4,571734	-74,090375	98,55984935
9	-103	-20	-61	4,571651	-74,090234	80,56002642
10	-105	-18	-63	4,571665	-74,090211	78,83283321
11	-96	-16	-61	4,571673	-74,09014	72,12815084
12	-97	-16	-61	4,571602	-74,090223	77,49209639
13	-93	-15	-57	4,571599	-74,090036	58,14382058
14	-84	-11	-51	4,571599	-74,090014	55,95024491
15	-90	-15	-57	4,571508	-74,090054	56,50349236
16	-94	-14	-55	4,57146	-74,089867	35,10283191
17	-92	-16	-57	4,571467	-74,089865	35,10835163
18	-91	-15	-57	4,571452	-74,089882	36,48802084
19	-88	-12	-57	4,571448	-74,089802	27,812802
20	-83	-13	-51	4,571461	-74,089827	30,89031795
21	-90	-14	-53	4,571398	-74,089749	20,88447094
22	-89	-11	-55	4,571366	-74,089715	16,98784859
23	-87	-13	-55	4,57133	-74,089666	12,56665105
24	-81	-12	-51	4,571323	-74,0896	7,15298254
25	-80	-10	-51	4,571342	-74,08955	3,903907525
26	-81	-10	-51	4,571232	-74,08939	24,82535352
27	-83	-9	-55	4,571221	-74,089331	30,80295671
28	-83	-10	-55	4,5712191	-74,089301	33,72568944
29	-84	-11	-53	4,57124	-74,089269	35,77801423
30	-86	-9	-55	4,571271	-74,089261	35,31044357
31	-82	-10	-53	4,571225	-74,089245	38,89440185

32	-81	-10	-51	4,571069	-74,089143	57,57299466
33	-81	-10	-51	4,571032	-74,089058	67,64198273
34	-79	-9	-51	4,571	-74,08904	71,31909609
35	-82	-8	-51	4,570996	-74,088963	78,63944076
36	-81	-10	-51	4,571019	-74,088934	80,07695309
37	-76	-10	-51	4,570953	-74,088861	90,76966347
38	-79	-10	-51	4,570901	-74,08879	100,4992257
39	-83	-10	-51	4,570866	-74,088744	106,8834018
40	-82	-10	-51	4,570855	-74,088732	108,659908
41	-79	-10	-51	4,570846	-74,088702	112,0116634
42	-79	-11	-51	4,570816	-74,088647	118,9519584
43	-77	-9	-51	4,570802	-74,088633	121,0895911
44	-78	-10	-51	4,570802	-74,088633	121,0895911
45	-79	-11	-51	4,570896	-74,088648	114,4568552
46	-80	-11	-51	4,570905	-74,088655	113,3056659
47	-84	-15	-51	4,570934	-74,088666	110,760325
48	-86	-16	-51	4,570993	-74,08867	107,6085635
49	-78	-13	-51	4,571203	-74,088718	95,48494861
50	-79	-13	-51	4,571203	-74,088801	86,49116259
51	-81	-12	-51	4,57125	-74,08896	68,15865156
52	-82	-13	-51	4,571298	-74,08873	92,61647506
53	-82	-13	-51	4,571325	-74,08865	101,2399383
54	-84	-12	-53	4,571494	-74,088833	81,87953435
55	-88	-16	-51	4,5716	-74,088841	83,7412204
56	-81	-11	-51	4,571637	-74,088842	84,95690807
57	-85	-13	-53	4,571776	-74,088843	91,32060168
58	-84	-11	-53	4,571832	-74,088833	95,45384243
59	-86	-11	-53	4,571925	-74,088919	93,91342096
60	-84	-12	-53	4,571943	-74,088917	95,3950009
61	-78	-9	-51	4,571968	-74,088923	96,76999452
62	-79	-9	-51	4,571974	-74,088912	98,1175939
63	-83	-12	-51	4,571988	-74,088906	99,66501826
64	-83	-11	-51	4,572214	-74,089141	104,3121648
65	-81	-15	-51	4,572282	-74,0892	108,542437
66	-81	-15	-51	4,572329	-74,0893	109,983229
67	-84	-15	-51	4,572367	-74,089368	112,3817817
68	-86	-14	-53	4,572372	-74,089388	112,5264447
69	-83	-15	-51	4,572351	-74,089416	109,72615
70	-82	-13	-51	4,572479	-74,089476	123,1287392

71	-84	-15	-51	4,572525	-74,089522	127,9509827
72	-81	-14	-51	4,572536	-74,089558	129,0980434
73	-81	-14	-51	4,572552	-74,089567	130,877631
74	-82	-14	-51	4,572578	-74,089579	133,7807119
75	-82	-17	-51	4,572671	-74,089658	144,5009107
76	-82	-16	-51	4,572701	-74,089701	148,2472358
77	-82	-14	-51	4,572738	-74,089743	152,8807631
78	-82	-14	-51	4,572755	-74,08976	155,0104464
79	-77	-12	-51	4,57275	-74,089773	154,6713949
80	-79	-12	-51	4,572945	-74,089887	178,2539344
81	-79	-12	-51	4,572998	-74,089998	186,8278906
82	-83	-12	-51	4,573018	-74,090028	189,8545512
83	-82	-11	-52	4,57303	-74,090042	191,5640707
84	-82	-10	-53	4,573064	-74,090058	195,6895842
85	-83	-9	-54	4,5731	-74,09009	200,5408345
86	-84	-9	-53	4,573183	-74,090162	211,754858
87	-97	-12	-65	4,573228	-74,090207	218,0948747
88	-93	-13	-59	4,573167	-74,090339	217,076778
89	-94	-13	-60	4,57325	-74,0909	255,8568983
90	-96	-13	-65	4,57305	-74,09045	210,6596293
91	-92	-11	-61	4,572935	-74,090539	204,4917777
92	-95	-13	-63	4,572806	-74,090672	201,1378096
93	-97	-12	-64	4,572865	-74,090805	215,4810434
94	-98	-12	-65	4,572885	-74,090898	223,8763947
95	-94	-11	-63	4,572897	-74,090897	224,8059036
96	-93	-10	-62	4,56893	-74,09	276,1722808
97	-102	-16	-63	4,573003	-74,090932	236,2822086
98	-94	-13	-61	4,573032	-74,091117	252,2999986
99	-94	-12	-62	4,573	-74,09113	250,7100664
100	-95	-12	-63	4,569642	-74,088223	243,2304956

Ruta 2 - BTS 2

MUESTRA	RSRP(dBm)	RSRQ(dBm)	RSSI(dBm)	LATITUD	LONGITUD	DISTANCIA(m)
1	-86	-9	-57	4,651666667	-74,10694444	298,7794823
2	-90	-11	-57	4,651666667	-74,10694444	298,7794823
3	-73	-7	-51	4,651111111	-74,10694444	332,3875813
4	-94	-10	-65	4,650833333	-74,10694444	352,0650278

5	-90	-11	-59	4,651944444	-74,10944444	110,7469793
6	-97	-11	-67	4,651944444	-74,10944444	110,7469793
7	-93	-9	-65	4,652222222	-74,11	109,0343366
8	-87	-9	-59	4,653055556	-74,11	76,34816836
9	-101	-10	-71	4,653611111	-74,11027778	130,0108317
10	-111	-14	-79	4,653611111	-74,11027778	130,0108317
11	-96	-8	-67	4,653888889	-74,11	130,1624562
12	-71	-8	-51	4,654444444	-74,10944444	168,6175971
13	-61	-5	-51	4,653888889	-74,10916667	107,6857994
14	-96	-13	-63	4,654166667	-74,10861111	158,2096954
15	-89	-10	-59	4,654166667	-74,10861111	158,2096954
16	-67	-11	-51	4,653055556	-74,10833333	110,4382366
17	-90	-10	-61	4,653055556	-74,10833333	110,4382366
18	-71	-12	-51	4,653055556	-74,10861111	79,97846701
19	-86	-13	-55	4,653055556	-74,10694444	263,8742447
20	-91	-14	-61	4,653055556	-74,10722222	233,1351339
21	-81	-11	-51	4,651388889	-74,10666667	340,7264348
22	-98	-11	-69	4,651388889	-74,10666667	340,7264348
23	-101	-12	-69	4,651111111	-74,10638889	383,0449398
24	-76	-7	-51	4,651388889	-74,10861111	188,9129419
25	-79	-9	-51	4,653055556	-74,10888889	49,92017176
26	-70	-9	-51	4,653888889	-74,10944444	107,157479
27	-88	-11	-57	4,654444444	-74,10972222	173,8214752
28	-96	-11	-67	4,654444444	-74,10972222	173,8214752
29	-103	-10	-73	4,654444444	-74,10972222	173,8214752
30	-116	-11	-85	4,653888889	-74,11	130,1624562
31	-98	-10	-73	4,653611111	-74,11027778	130,0108317
32	-86	-14	-55	4,653333333	-74,10972222	62,83189257
33	-75	-5	-73	4,652777778	-74,10972222	47,57357353
34	-60	-10	-61	4,653055556	-74,10972222	46,38441896
35	-60	-12	-67	4,652777778	-74,10944444	21,9370393
36	-81	-10	-83	4,652777778	-74,10916667	24,38728712
37	-74	-7	-77	4,6525	-74,10916667	51,13277193
38	-74	-5	-75	4,651944444	-74,10888889	119,9475462
39	-58	-7	-59	4,651111111	-74,10777778	265,2075449
40	-58	-7	-59	4,651111111	-74,10805556	246,4628397
41	-79	-10	-75	4,651111111	-74,10805556	246,4628397
42	-79	-10	-73	4,650833333	-74,1075	308,6907016
43	-75	-11	-75	4,650555556	-74,10777778	314,927987

44	-75	-7	-75	4,650833333	-74,10777778	289,4880022
45	-66	-6	-65	4,650833333	-74,10777778	289,4880022
46	-72	-7	-73	4,651111111	-74,10833333	230,3222484
47	-52	-9	-53	4,651388889	-74,10861111	188,9129419
48	-85	-10	-85	4,651666667	-74,10888889	148,7664593
49	-91	-10	-93	4,651666667	-74,10916667	141,8535726
50	-91	-12	-91	4,651666667	-74,10916667	141,8535726
51	-79	-13	-83	4,6525	-74,11027778	116,3342115
52	-86	-11	-85	4,6525	-74,11027778	116,3342115
53	-88	-13	-91	4,6525	-74,11027778	116,3342115
54	-92	-16	-97	4,652222222	-74,11055556	157,8927276
55	-97	-17	-97	4,652222222	-74,11055556	157,8927276
56	-95	-11	-95	4,653888889	-74,10972222	115,1726379
57	-113	-12	-53	4,653888889	-74,11	130,1624562
58	-99	-11	-99	4,653611111	-74,11027778	130,0108317
59	-99	-10	-99	4,653611111	-74,11027778	130,0108317
60	-86	-8	-85	4,653611111	-74,11027778	130,0108317
61	-95	-11	-97	4,653333333	-74,11	87,32339442
62	-85	-9	-83	4,653055556	-74,11	76,34816836
63	-89	-7	-85	4,653055556	-74,11	76,34816836
64	-75	-7	-75	4,652777778	-74,10972222	47,57357353
65	-62	-8	-63	4,652777778	-74,10972222	47,57357353
66	-71	-12	-73	4,653055556	-74,10944444	19,22246387
67	-62	-13	-73	4,653055556	-74,10944444	19,22246387
68	-86	-10	-87	4,652777778	-74,10972222	47,57357353
69	-87	-10	-87	4,652777778	-74,10972222	47,57357353
70	-93	-16	-87	4,653333333	-74,11	87,32339442
71	-99	-15	-99	4,653333333	-74,11	87,32339442
72	-80	-9	-85	4,653333333	-74,11027778	114,884381
73	-84	-8	-87	4,653333333	-74,11027778	114,884381
74	-82	-11	-83	4,653055556	-74,11	76,34816836
75	-73	-6	-75	4,653055556	-74,11	76,34816836
76	-94	-9	-95	4,652777778	-74,10944444	21,9370393
77	-99	-18	-97	4,652222222	-74,10944444	80,18065761
78	-80	-12	-81	4,652777778	-74,10944444	21,9370393
79	-82	-10	-83	4,652777778	-74,10916667	24,38728712
80	-78	-11	-79	4,652222222	-74,10916667	80,88537528
81	-74	-10	-75	4,6525	-74,10916667	51,13277193
82	-71	-9	-73	4,652777778	-74,10861111	80,67400308

83	-78	-11	-79	4,653055556	-74,10861111	79,97846701
84	-80	-6	-79	4,653055556	-74,10833333	110,4382366
85	-83	-9	-87	4,653611111	-74,10666667	303,8148175
86	-85	-12	-85	4,653888889	-74,10722222	255,8615832
87	-68	-12	-73	4,651666667	-74,10861111	161,3567478
88	-70	-7	-71	4,651944444	-74,10805556	178,2907897
89	-70	-6	-71	4,651388889	-74,10833333	203,6864418
90	-63	-9	-65	4,651388889	-74,10833333	203,6864418
91	-73	-7	-63	4,651111111	-74,10805556	246,4628397
92	-69	-9	-71	4,651111111	-74,10722222	308,5511981
93	-57	-8	-69	4,651111111	-74,1075	286,0448893
94	-82	-9	-81	4,651111111	-74,1075	286,0448893
95	-73	-8	-77	4,650555556	-74,1075	332,6654217
96	-78	-5	-73	4,650833333	-74,1075	308,6907016
97	-84	-13	-85	4,650555556	-74,10722222	352,2051191
98	-104	-12	-105	4,650277778	-74,10638889	439,1497759
99	-98	-12	-99	4,651111111	-74,10638889	383,0449398
100	-88	-13	-91	4,651111111	-74,10638889	383,0449398

Ruta 3 - BTS 3

MUESTRA	RSRP(dBm)	RSRQ(dBm)	RSSI(dBm)	LATITUD	LONGITUD	DISTANCIA(m)
1	-72	-10	-51	4,652101476	-74,08574784	17,32302568
2	-76	-8	-51	4,652119567	-74,08578328	17,85414709
3	-76	-9	-51	4,65214692	-74,0858101	18,02371072
4	-84	-13	-51	4,652171168	-74,08583379	18,97827605
5	-84	-11	-51	4,652187644	-74,08585444	20,49129531
6	-83	-10	-51	4,652213663	-74,08587685	22,31403641
7	-83	-12	-51	4,652241528	-74,08591895	26,77966413
8	-83	-13	-51	4,652264118	-74,08595083	30,42628165
9	-81	-12	-56	4,652283337	-74,08598653	34,59854384
10	-80	-11	-55	4,652304751	-74,08601719	38,33858309
11	-77	-7	-51	4,65232856	-74,08606259	43,80685403
12	-76	-10	-51	4,652355138	-74,08609228	47,72290821
13	-74	-9	-51	4,652385168	-74,08612599	52,26220488
14	-74	-9	-51	4,652421606	-74,08617689	58,9147532
15	-74	-9	-51	4,652454699	-74,08622836	65,55060622
16	-80	-7	-57	4,652479644	-74,08624089	67,88398252

17	-80	-7	-57	4,652520703	-74,08621531	67,27390127
18	-83	-8	-57	4,652560413	-74,08617598	65,72382403
19	-89	-9	-57	4,652604808	-74,08614565	65,8401445
20	-89	-10	-57	4,652659047	-74,08611893	67,53724054
21	-89	-10	-57	4,652714359	-74,08609551	70,17292034
22	-88	-7	-57	4,652754303	-74,08605354	70,7281987
23	-89	-9	-57	4,652813981	-74,08601909	74,16822812
24	-89	-9	-57	4,652869697	-74,08597779	77,48296592
25	-89	-9	-57	4,652911379	-74,08594576	80,31066106
26	-77	-7	-51	4,652961222	-74,08590914	84,15686195
27	-77	-7	-51	4,652999333	-74,08588431	87,43984169
28	-77	-7	-51	4,653052138	-74,08584854	92,22190953
29	-77	-7	-51	4,653133298	-74,08580719	100,3111264
30	-77	-7	-51	4,65317336	-74,08578089	104,3610133
31	-78	-7	-51	4,653230541	-74,08574517	110,3426316
32	-83	-8	-53	4,653282527	-74,0857045	115,905774
33	-83	-8	-53	4,653251418	-74,08565864	112,426563
34	-83	-8	-53	4,653231338	-74,08561271	110,4071802
35	-83	-8	-53	4,653211359	-74,08555862	108,7517299
36	-83	-9	-55	4,653164976	-74,08551316	104,3931778
37	-83	-9	-55	4,653148715	-74,08548493	103,2138812
38	-83	-9	-55	4,653122063	-74,08545772	101,0000925
39	-83	-9	-55	4,653103768	-74,08542582	99,95456157
40	-78	-10	-51	4,653077665	-74,08540319	97,91953571
41	-78	-10	-51	4,653060181	-74,08536118	97,64546524
42	-78	-10	-51	4,653042107	-74,08529694	98,5998023
43	-78	-9	-51	4,653007676	-74,085256	97,24831989
44	-78	-9	-51	4,652982061	-74,08521631	97,00283227
45	-78	-9	-51	4,652966811	-74,08519389	96,91680423
46	-81	-10	-51	4,652949114	-74,08516384	97,19492311
47	-81	-10	-51	4,652911654	-74,08515098	94,72092937
48	-81	-10	-51	4,652899319	-74,08512461	95,49202751
49	-83	-9	-53	4,652882276	-74,08508703	96,81040684
50	-83	-9	-53	4,652853301	-74,08505359	97,06427399
51	-83	-9	-53	4,652846697	-74,08501062	100,0150911
52	-80	-7	-55	4,65281057	-74,08497137	100,6944475
53	-80	-7	-55	4,652798294	-74,08495797	101,0087479
54	-80	-7	-55	4,652781227	-74,08493774	101,6537629
55	-81	-11	-52	4,652769391	-74,0849145	102,984628

56	-85	-9	-51	4,652748277	-74,08488539	104,3604951
57	-85	-9	-51	4,652715383	-74,0848708	103,8167728
58	-85	-9	-51	4,652711086	-74,0848405	106,4861777
59	-83	-8	-53	4,652684226	-74,08479176	109,8490011
60	-83	-7	-53	4,652655379	-74,08474592	113,0646318
61	-81	-7	-55	4,652631002	-74,08471884	114,7583992
62	-74	-6	-51	4,652615523	-74,08469577	116,502051
63	-74	-6	-51	4,652593383	-74,0846708	118,2506313
64	-74	-6	-51	4,652566979	-74,08464723	119,7958955
65	-75	-8	-51	4,652525483	-74,08466732	116,3354511
66	-75	-8	-51	4,652482882	-74,08467616	114,1831706
67	-75	-7	-51	4,652432711	-74,08471808	108,4380546
68	-74	-8	-51	4,652422389	-74,08472427	107,5438017
69	-69	-10	-51	4,652420331	-74,08472477	107,4465439
70	-79	-9	-51	4,652377472	-74,08474973	103,9253199
71	-79	-9	-51	4,652325099	-74,08479492	98,24638364
72	-79	-9	-51	4,652295551	-74,08481433	95,83952256
73	-79	-9	-51	4,652260822	-74,08482924	94,01863924
74	-80	-9	-52	4,652232196	-74,08485506	91,13452369
75	-81	-9	-52	4,652192676	-74,08488652	87,80447616
76	-80	-9	-52	4,652154112	-74,08489976	86,70976648
77	-77	-9	-51	4,652154112	-74,08489976	86,70976648
78	-73	-8	-51	4,652085619	-74,084962	81,12725314
79	-73	-8	-51	4,652044608	-74,08498426	79,84002117
80	-75	-11	-51	4,652007692	-74,08499883	79,52773599
81	-71	-5	-51	4,651983086	-74,08503444	76,78440613
82	-71	-7	-51	4,651940205	-74,08505665	76,46476928
83	-72	-11	-51	4,651914874	-74,0850701	76,42020238
84	-77	-8	-51	4,651845464	-74,08513123	74,78352973
85	-77	-8	-51	4,651810243	-74,08515699	74,93041661
86	-76	-9	-51	4,651783364	-74,08519058	74,12142926
87	-76	-9	-51	4,651776919	-74,08523649	71,02315155
88	-75	-10	-51	4,6517907	-74,08529854	65,29920046
89	-75	-10	-51	4,651809627	-74,08532626	61,72021102
90	-75	-10	-51	4,651830363	-74,08534915	58,33339535
91	-75	-10	-51	4,651872401	-74,08541521	50,19267899
92	-74	-10	-51	4,651896909	-74,08544519	46,061233
93	-74	-9	-51	4,651920061	-74,08546081	42,9589304
94	-74	-9	-51	4,651931642	-74,08549768	39,69816854

95	-74	-9	-51	4,651976858	-74,08557033	31,62428582
96	-71	-10	-51	4,651996936	-74,08560416	28,27207602
97	-75	-9	-51	4,65201891	-74,08562466	25,32282292
98	-84	-10	-51	4,652044654	-74,08565864	21,87676779
99	-76	-7	-51	4,652065695	-74,08568463	19,45571486
100	-77	-8	-51	4,652085271	-74,08571945	17,88264535

Ruta 4 - BTS 4

MUESTRA	RSRP(dBm)	RSRQ(dBm)	RSSI(dBm)	LATITUD	LONGITUD	DISTANCIA(m)
1	-76	-14	-64	4,674037	-74,055075	193,78
2	-82	-9	-58	4,674064	-74,055403	206,27
3	-83	-11	-57	4,673731	-74,054769	155,32
4	-80	-10	-60	4,673427	-74,054551	123
5	-73	-6	-67	4,673856	-74,054936	171,03
6	-71	-7	-69	4,673614	-74,05459	142,31
7	-75	-7	-65	4,673418	-74,054487	123,52
8	-72	-8	-68	4,673653	-74,05455	148,09
9	-78	-10	-62	4,673697	-74,054388	155,94
10	-82	-7	-58	4,673468	-74,054393	131,31
11	-89	-8	-51	4,673381	-74,054231	128,13
12	-83	-10	-57	4,672988	-74,055014	79,27
13	-78	-8	-62	4,673021	-74,055015	83,28
14	-86	-11	-54	4,6735	-74,05568	168,11
15	-84	-12	-56	4,673413	-74,055882	175,67
16	-88	-14	-52	4,673796	-74,055932	210,72
17	-83	-10	-57	4,673411	-74,055992	184,51
18	-88	-12	-52	4,673737	-74,056141	221,48
19	-72	-8	-68	4,673746	-74,056062	216,43
20	-85	-7	-55	4,673733	-74,055774	194,7
21	-82	-12	-58	4,67317	-74,055859	156,7
22	-79	-12	-61	4,6735	-74,055601	162,53
23	-92	-13	-48	4,673932	-74,054271	184,86
24	-85	-11	-55	4,673847	-74,0544	172,02
25	-77	-8	-63	4,673723	-74,05459	154,17
26	-74	-8	-66	4,67392	-74,054939	178
27	-74	-8	-66	4,673824	-74,054884	166,82

28	-76	-8	-64	4,673841	-74,054954	169,85
29	-73	-10	-67	4,673882	-74,055061	176,46
30	-77	-7	-63	4,673756	-74,054816	158,31
31	-78	-8	-62	4,673637	-74,054549	146,25
32	-79	-9	-61	4,673482	-74,054339	134,58
33	-80	-9	-60	4,673388	-74,054218	130,51
34	-84	-9	-56	4,67319	-74,055508	129,11
35	-85	-8	-55	4,673212	-74,055501	130
36	-80	-8	-60	4,67299	-74,055126	86,19
37	-81	-9	-59	4,672889	-74,055286	87,17
38	-87	-8	-53	4,672786	-74,055349	86,03
39	-91	-12	-49	4,672683	-74,056043	151,25
40	-89	-9	-51	4,672745	-74,056017	150,55
41	-78	-8	-62	4,672889	-74,055962	150,74
42	-72	-7	-68	4,673291	-74,055721	153,6
43	-72	-10	-68	4,673177	-74,055765	149,02
44	-79	-9	-61	4,673324	-74,055718	155,93
45	-82	-8	-58	4,673415	-74,055704	161,99
46	-82	-10	-58	4,673688	-74,055681	184,16
47	-72	-11	-68	4,673956	-74,055226	188,3
48	-81	-9	-59	4,674162	-74,055664	228,45
49	-83	-12	-57	4,673999	-74,055352	198
50	-87	-10	-53	4,674065	-74,055404	206,21
51	-87	-7	-53	4,673838	-74,05508	172
52	-76	-7	-64	4,673242	-74,055397	124,79
53	-71	-7	-69	4,673804	-74,054959	165,13
54	-81	-6	-59	4,673787	-74,054739	161,17
55	-81	-8	-59	4,673744	-74,054648	157,23
56	-87	-8	-53	4,67365	-74,05445	149,44
57	-89	-11	-51	4,673342	-74,054154	128,99
58	-84	-8	-56	4,672844	-74,054649	57,83
59	-84	-7	-56	4,67292	-74,054986	71,6
60	-78	-6	-62	4,672981	-74,055075	94,16
61	-87	-7	-53	4,67305	-74,055173	107,81
62	-83	-7	-57	4,673015	-74,05523	94,63
63	-82	-6	-58	4,672909	-74,055294	91,31
64	-84	-9	-56	4,6727	-74,055421	87,57
65	-84	-6	-56	4,672691	-74,055421	87,05
66	-67	-8	-73	4,672813	-74,055325	85,37

67	-75	-6	-65	4,672934	-74,055306	93,23
68	-82	-6	-58	4,673075	-74,05545	115,67
69	-75	-6	-65	4,673271	-74,055718	151,91
70	-75	-6	-65	4,673395	-74,055914	177,01
71	-80	-7	-60	4,673552	-74,056185	211,14
72	-77	-8	-63	4,673559	-74,056345	225,75
73	-74	-8	-66	4,67384	-74,055661	196,72
74	-74	-8	-66	4,673591	-74,056259	220,71
75	-80	-9	-60	4,67337	-74,055937	176,99
76	-85	-11	-55	4,673305	-74,05574	156,23
77	-78	-8	-62	4,673256	-74,055545	136,98
78	-81	-7	-59	4,673244	-74,055541	136,3
79	-83	-10	-57	4,673257	-74,055519	135,51
80	-80	-10	-60	4,673428	-74,055604	155,95
81	-75	-7	-65	4,674	-74,055134	190,12
82	-74	-9	-66	4,673861	-74,054965	171,53
83	-77	-6	-63	4,673736	-74,054788	155,61
84	-71	-6	-69	4,673727	-74,054773	154,57
85	-82	-7	-58	4,673656	-74,054571	147,97
86	-89	-10	-51	4,673493	-74,054288	137,55
87	-84	-8	-56	4,673409	-74,054273	129,77
88	-85	-10	-55	4,67327	-74,054135	123,25
89	-89	-10	-51	4,673592	-74,054548	141,53
90	-80	-7	-60	4,672733	-74,05449	51,86
91	-85	-7	-55	4,673337	-74,053698	159,62
92	-82	-6	-58	4,67366	-74,054695	147,47
93	-72	-7	-68	4,673676	-74,054734	149
94	-66	-6	-74	4,673656	-74,054744	146,99
95	-69	-6	-71	4,673671	-74,054729	148,73
96	-84	-8	-56	4,673673	-74,054731	149,16
97	-89	-10	-51	4,673592	-74,054548	141,53
98	-75	-6	-65	4,672934	-74,055306	93,23
99	-87	-8	-53	4,67365	-74,05445	149,44
100	-73	-6	-67	4,673856	-74,054936	171,03

Ruta 5 - BTS 5

MUESTRA	RSRP(dBm)	RSRQ(dBm)	RSSI(dBm)	LATITUD	LONGITUD	DISTANCIA(m)
1	-78	-10	-81	4,6491523	-74,1174142	294,8535386
2	-73	-11	-77	4,64893325	-74,1174215	270,5865008
3	-70	-11	-77	4,64878851	-74,1175281	255,5898193
4	-60	-12	-76	4,64864425	-74,1176819	242,3045459
5	-72	-12	-77	4,64848093	-74,1177693	226,6791721
6	-72	-11	-77	4,64831834	-74,1179034	213,6327304
7	-76	-11	-79	4,64814263	-74,1180207	200,3543732
8	-79	-11	-81	4,64820983	-74,1182612	219,2683977
9	-90	-11	-87	4,64841898	-74,1184482	249,8674319
10	-92	-14	-87	4,64856607	-74,118651	275,7728245
11	-98	-14	-91	4,6487102	-74,1189017	304,876665
12	-91	-13	-87	4,64899993	-74,1192464	353,6752826
13	-88	-15	-85	4,64889305	-74,1196732	376,3202401
14	-84	-15	-83	4,64878639	-74,119873	384,3901376
15	-84	-13	-83	4,64857147	-74,1199961	379,8262207
16	-94	-14	-89	4,64830183	-74,120269	388,0606506
17	-91	-14	-87	4,64805539	-74,1204471	392,3150505
18	-90	-15	-87	4,64786337	-74,1206604	405,2477968
19	-90	-13	-87	4,64751741	-74,1208509	412,802376
20	-90	-13	-87	4,6473124	-74,1210254	426,0542916
21	-90	-13	-87	4,64709567	-74,12126	447,3387708
22	-90	-14	-87	4,64683024	-74,1213613	455,1495319
23	-88	-14	-85	4,64651766	-74,1209959	413,2149444
24	-95	-20	-89	4,64626028	-74,1206899	380,2759893
25	-93	-13	-87	4,64597383	-74,1203533	347,0531316
26	-89	-14	-85	4,64612351	-74,1205357	364,6814391
27	-94	-11	-89	4,64634807	-74,1208254	394,6994583
28	-92	-12	-87	4,6459631	-74,1202675	337,8927705
29	-93	-15	-87	4,64582409	-74,1201924	332,8762423
30	-95	-15	-89	4,64559417	-74,1198866	307,4204019
31	-94	-17	-89	4,64497395	-74,1191275	267,3314104
32	-92	-15	-87	4,64472532	-74,1188325	263,1141503
33	-88	-16	-85	4,64580082	-74,1200936	322,8475637
34	-80	-12	-81	4,6455366	-74,1197523	295,6755093
35	-74	-11	-79	4,64535201	-74,1194965	278,3094931

36	-70	-10	-77	4,64501992	-74,1191574	266,6986491
37	-68	-12	-75	4,64478118	-74,1189613	268,2617206
38	-70	-13	-77	4,64458855	-74,1186837	264,6324794
39	-62	-13	-73	4,64459027	-74,1183238	242,9387783
40	-72	-13	-77	4,64479749	-74,1181644	214,2765597
41	-75	-11	-79	4,64512782	-74,1178934	168,0764501
42	-75	-12	-79	4,64546166	-74,1176903	125,0851361
43	-75	-14	-79	4,64567919	-74,1174494	93,97606736
44	-79	-13	-81	4,64564773	-74,1171211	96,65737487
45	-83	-12	-83	4,64536734	-74,1167266	139,9515349
46	-83	-11	-83	4,64523159	-74,1165177	164,1503778
47	-82	-11	-83	4,64504975	-74,1162506	197,1659411
48	-83	-11	-83	4,64485499	-74,115986	231,9898001
49	-85	-12	-83	4,64469258	-74,1157822	260,1894051
50	-85	-11	-83	4,6445614	-74,1155511	287,8845407
51	-87	-12	-85	4,64440167	-74,1151352	332,4621529
52	-73	-11	-77	4,64412786	-74,1148399	377,1464318
53	-97	-13	-89	4,64381557	-74,1144655	431,1023066
54	-98	-13	-91	4,64360559	-74,1141776	470,3119096
55	-100	-14	-91	4,64390033	-74,113953	467,7632654
56	-99	-14	-91	4,64419874	-74,1136828	472,8501047
57	-104	-17	-93	4,64457738	-74,1134022	479,0061288
58	-106	-19	-95	4,64494865	-74,1131461	488,449821
59	-106	-20	-95	4,64524837	-74,1133617	454,8574827
60	-104	-17	-93	4,64538454	-74,1135748	427,7960131
61	-103	-17	-93	4,64555332	-74,113817	396,7827338
62	-96	-14	-89	4,64575456	-74,1140303	368,3416524
63	-95	-13	-89	4,64606805	-74,114287	333,8790345
64	-92	-11	-87	4,6463716	-74,1145631	300,096063
65	-99	-13	-91	4,64658175	-74,1147242	282,0053785
66	-101	-14	-91	4,64686025	-74,1147175	285,3738477
67	-100	-14	-91	4,64702442	-74,1144681	315,597702
68	-101	-13	-91	4,64729249	-74,114259	344,7488912
69	-98	-11	-91	4,64754703	-74,1140634	373,5519408
70	-101	-13	-91	4,64779121	-74,1138806	401,7050584
71	-101	-13	-91	4,64800164	-74,1137607	422,8043125
72	-108	-15	-95	4,64824996	-74,1137327	437,1992085
73	-107	-14	-95	4,64846322	-74,1139455	427,7657797
74	-108	-15	-95	4,64856852	-74,114133	416,3541052

75	-101	-20	-91	4,64871431	-74,1142234	417,3671634
76	-107	-17	-95	4,64887935	-74,1144586	408,2132923
77	-106	-18	-95	4,64875173	-74,1146548	382,4655323
78	-105	-18	-93	4,64846004	-74,1148057	348,8827381
79	-93	-19	-87	4,64822667	-74,1150008	315,8765009
80	-104	-18	-93	4,64828806	-74,1151577	306,5996702
81	-94	-17	-89	4,64841225	-74,115347	300,4924888
82	-104	-17	-93	4,64858991	-74,1154416	307,7616408
83	-90	-14	-87	4,64871287	-74,1155073	313,6051025
84	-90	-17	-87	4,64850702	-74,1152726	313,7776905
85	-84	-14	-83	4,6484589	-74,1152109	314,916425
86	-75	-13	-79	4,64837068	-74,1150607	320,7350931
87	-75	-14	-79	4,64838538	-74,1150031	326,67923
88	-78	-14	-81	4,64883451	-74,1156522	314,9094274
89	-70	-10	-77	4,64875966	-74,115565	313,8106917
90	-93	-18	-87	4,64891204	-74,115738	316,8492273
91	-83	-12	-83	4,64894278	-74,1157849	317,0152729
92	-81	-13	-81	4,64875334	-74,1155689	312,9869343
93	-82	-11	-83	4,64889798	-74,1157778	313,1784542
94	-77	-11	-79	4,64909942	-74,1160533	318,3637206
95	-76	-11	-79	4,64932115	-74,1162016	334,7183145
96	-77	-10	-79	4,64948755	-74,1163832	345,8593494
97	-79	-11	-81	4,64963832	-74,1165167	358,2454384
98	-77	-11	-79	4,64984819	-74,1164222	383,4073286
99	-77	-12	-79	4,65007603	-74,116426	407,9240506
100	-85	-11	-83	4,65026752	-74,1165123	426,7023457

Anexo 2

Código Matlab - Variación de Potencia en el Muestreo

```
X=[1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13
   14  15  16  17  18  19  20  21  22  23  24  25
   26  27  28  29  30  31  32  33  34  35  36  37
   38  39  40  41  42  43  44  45  46  47  48  49
   50  51  52  53  54  55  56  57  58  59  60  61
   62  63  64  65  66  67  68  69  70  71  72  73
   74  75  76  77  78  79  80  81  82  83  84  85
   86  87  88  89  90  91  92  93  94  95  96  97
   98  99  100 ];
RSRP=[-86  -90  -73  -94  -90  -97  -93  -87  -101  -111  -96  -71
   -61  -96  -89  -67  -90  -71  -86  -91  -81  -98  -101  -76
   -79  -70  -88  -96  -103  -116  -98  -86  -75  -60  -60  -81
   -74  -74  -58  -58  -79  -79  -75  -75  -66  -72  -52  -85
```

```
        -91     -91     -79     -86     -88     -92     -97     -95     -113    -99     -99     -86
        -95     -85     -89     -75     -62     -71     -62     -86     -87     -93     -99     -80
        -84     -82     -73     -94     -99     -80     -82     -78     -74     -71     -78     -80
        -83     -85     -68     -70     -70     -63     -73     -69     -57     -82     -73     -78
        -84     -104    -98     -88];
RSSI=[-65       -65     -63     -63     -65     -65     -63     -61     -61     -63     -61     -61
        -57     -51     -57     -55     -57     -57     -57     -51     -53     -55     -55     -51
        -51     -51     -55     -55     -53     -55     -53     -51     -51     -51     -51     -51
        -51     -51     -51     -51     -51     -51     -51     -51     -51     -51     -51     -51
        -51     -51     -51     -51     -51     -53     -51     -51     -53     -53     -53     -53
        -51     -51     -51     -51     -51     -51     -51     -53     -51     -51     -51     -51
        -51     -51     -51     -51     -51     -51     -51     -51     -51     -51     -52     -53
        -54     -53     -65     -59     -60     -65     -61     -63     -64     -65     -63     -62
        -63     -61     -62     -63];
RSRQ=[-9        -11     -7      -10     -11     -11     -9      -9      -10     -14     -8      -8
        -5      -13     -10     -11     -10     -12     -13     -14     -11     -11     -12     -7
        -9      -9      -11     -11     -10     -11     -10     -14     -5      -10     -12     -10
        -7      -5      -7      -7      -10     -10     -11     -7      -6      -7      -9      -10
        -10     -12     -13     -11     -13     -16     -17     -11     -12     -11     -10     -8
        -11     -9      -7      -7      -8      -12     -13     -10     -10     -16     -15     -9
        -8      -11     -6      -9      -18     -12     -10     -11     -10     -9      -11     -6
        -9      -12     -12     -7      -6      -9      -7      -9      -8      -9      -8      -5
        -13     -12     -12     -13];


hold on
grid on
%%% gráficas de señales
stairs(X,RSSI,'G','LineWidth',1)
stairs(X,RSRP,'M','LineWidth',1)
ylabel('RSRP,RSSI(dBm)')
xlabel('muestras')
axis([0 100 -150 -45])

yyaxis right

stairs(X,RSRQ,'R','LineWidth',1)
ylabel('RSRQ(dB)')
axis([0 100 -25 0])
```

Anexo 3

Código Matlab - Gráficas de Funciones de Densidad de Probabilidad

```
X=[1    2       3       4       5       6       7       8       9       10      11      12      13
        14      15      16      17      18      19      20      21      22      23      24      25
        26      27      28      29      30      31      32      33      34      35      36      37
        38      39      40      41      42      43      44      45      46      47      48      49
        50      51      52      53      54      55      56      57      58      59      60      61
        62      63      64      65      66      67      68      69      70      71      72      73
        74      75      76      77      78      79      80      81      82      83      84      85
        86      87      88      89      90      91      92      93      94      95      96      97
        98      99      100     ];
RSRP=[-86       -90     -73     -94     -90     -97     -93     -87     -101    -111    -96     -71
        -61     -96     -89     -67     -90     -71     -86     -91     -81     -98     -101    -76
```

```
        -79     -70     -88     -96     -103    -116    -98     -86     -75     -60     -60     -81
        -74     -74     -58     -58     -79     -79     -75     -75     -66     -72     -52     -85
        -91     -91     -79     -86     -88     -92     -97     -95     -113    -99     -99     -86
        -95     -85     -89     -75     -62     -71     -62     -86     -87     -93     -99     -80
        -84     -82     -73     -94     -99     -80     -82     -78     -74     -71     -78     -80
        -83     -85     -68     -70     -70     -63     -73     -69     -57     -82     -73     -78
        -84     -104    -98     -88];
RSSI=[-57       -57     -51     -65     -59     -67     -65     -59     -71     -79     -67     -51
        -51     -63     -59     -51     -61     -51     -55     -61     -51     -69     -69     -51
        -51     -51     -57     -67     -73     -85     -73     -55     -73     -61     -67     -83
        -77     -75     -59     -59     -75     -73     -75     -75     -65     -73     -53     -85
        -93     -91     -83     -85     -91     -97     -97     -95     -53     -99     -99     -85
        -97     -83     -85     -75     -63     -73     -73     -87     -87     -87     -99     -85
        -87     -83     -75     -95     -97     -81     -83     -79     -75     -73     -79     -79
        -87     -85     -73     -71     -71     -65     -63     -71     -69     -81     -77     -73
        -85     -105    -99     -91];
RSRQ=[-9        -11     -7      -10     -11     -11     -9      -9      -10     -14     -8      -8
        -5      -13     -10     -11     -10     -12     -13     -14     -11     -11     -12     -7
        -9      -9      -11     -11     -10     -11     -10     -14     -5      -10     -12     -10
        -7      -5      -7      -7      -10     -10     -11     -7      -6      -7      -9      -10
        -10     -12     -13     -11     -13     -16     -17     -11     -12     -11     -10     -8
        -11     -9      -7      -7      -8      -12     -13     -10     -10     -16     -15     -9
        -8      -11     -6      -9      -18     -12     -10     -11     -10     -9      -11     -6
        -9      -12     -12     -7      -6      -9      -7      -9      -8      -9      -8      -5
        -13     -12     -12     -13];

mu= mean(RSSI);
sigma=std(RSSI);
h = 1.06 * sigma * 100^(-1/5);
pdfkernel = fitdist(RSSI,'Kernel','BandWidth',h);
pdflog = @(x) exp(-(x-mu)/sigma)./(sigma.*(1+exp(-(x-mu)/sigma)).^2);
pdfnorm =@(x) 1/(sqrt(2*pi)*sigma) * exp(-(x-mu).^2/(2*sigma^2));
pdfextreme=@(x) (1/sigma) * exp(-(x - mu)/sigma .* exp(-(x - mu)/sigma));
x = -120:1:-40;
pdf_kernel = pdf(pdfkernel,x);
pdf_normal = pdf(pdfnorm,x);
pdf_extreme = pdf(pdfextreme,x);
pdf_logistic = pdf(pdlog,x);
tabulate(RSSIp)
tbl=tabulate(RSSIp);
histfit(RSSIp)
hold on;
plot(x,pdf_kernel*540,'LineWidth',2);
%plot(x,pdf_normal*540,'Color','r','LineWidth',2);
plot(x,pdf_extreme*540,'LineWidth',2);
plot(x,pdf_logistic*540,'LineWidth',2);
legend('histograma','Normal Distribution','Kernel Distribution','ExtremeValue Distribution','logistic
Distribution','Location','SouthEast');
xlabel('RSSI(dBm)')
ylabel('Densidad')
hold off;
```