

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE ÁREAS DE SERVICIO E INTERFERENCIA Y
MÍNIMA SEPARACIÓN ESPACIAL PARA SISTEMAS DE COMUNICACIÓN
OPERANDO EN LA MISMA FRECUENCIA DE 30 MHZ A 466 MHZ**



**Universidad
del Cauca**

**CRISTIAM CAMILO SAMBONI LÓPEZ
CRISTHIAN DAVID JAIMES PANTOJA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO DE RADIO E INALÁMBRICAS- GRIAL
SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES E INALÁMBRICAS
POPAYÁN
2022**

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE ÁREAS DE SERVICIO E INTERFERENCIA Y
MÍNIMA SEPARACIÓN ESPACIAL PARA SISTEMAS DE COMUNICACIÓN
OPERANDO EN LA MISMA FRECUENCIA DE 30 MHZ A 466 MHZ**

**CRISTIAM CAMILO SAMBONI LÓPEZ
CRISTHIAN DAVID JAIMES PANTOJA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

Director: Ing. Diego Fernando Galvis Calambás

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO DE RADIO E INALÁMBRICAS- GRIAL
SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES E INALÁMBRICAS
POPAYÁN
2022**

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a nuestro director el ingeniero Diego Fernando Galvis Calambás y a Tirso Adelmo Mazabuel, quienes contribuyeron de manera valiosa en conocimientos, tiempo, esfuerzo y dedicación en el proceso de desarrollo del trabajo de grado.

Al Grupo de Radio e Inalámbricas – GRIAL, por todo su apoyo y esfuerzo en la investigación.

A la Universidad del Cauca, por su contribución a la construcción de una sociedad mejor.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABLAS.....	vi
LISTA DE ACRÓNIMOS	viii
INTRODUCCIÓN	1
1 CONCEPTUALIZACIÓN.....	3
1.1 ESPECTRO RADIOELÉCTRICO.....	3
1.1.1 Servicios Prestados en las Bandas de Interés	4
1.1.2 Ancho de Banda	4
1.2 MODOS DE TRANSMISIÓN.....	5
1.2.1 Modo Simplex.....	5
1.2.2 Modo Semidúplex.....	5
1.2.3 Modo Dúplex.....	5
1.3 RELEVANCIA RADIOELÉCTRICA DEL TERRENO EN EL MEDIO DE TRANSMISIÓN	5
1.3.1 Propagación Sobre Tierra Plana.....	7
1.3.2 La Troposfera en la Propagación.....	7
1.3.4 Propagación por Difracción	10
1.4 MODELOS DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN	12
1.4.1 Cálculo de Atenuación en Espacio Libre	12
1.4.2 Modelo de Dos Rayos	12
1.4.3 Modelo de Okumura-Hata	13
1.4.4 Modelo de Propagación de Pendiente Única.....	14
1.4.5 Modelo de Propagación Egli.....	14
1.4.6 Modelo de Propagación de Longley-Rice	15
1.5 FENÓMENOS PRESENTES EN LA PROPAGACIÓN.....	15
1.5.1 Ruido	15
1.5.2 Interferencia.....	16
1.5.3 Atenuación.....	19
1.5.4 Efecto Captura.....	19
1.5.5 Desvanecimiento	20
1.6 CONCEPTOS RELEVANTES EN ANÁLISIS DE SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICOS.....	21
1.6.1 Relación de Protección.....	21
1.6.2 Sensibilidad	22
1.6.3 Selectividad	22
1.6.4 Ganancia	22

1.6.5	Relación Señal a Ruido	22
1.6.6	Relación Portadora Interferencia	22
1.6.7	Área de Servicio	23
1.7	METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE INTERFERENCIA	24
1.7.1	Pérdidas de Acoplamiento Mínimo	24
1.7.2	Pérdidas de Acoplamiento Mínimo Mejorado	25
1.7.3	Recomendación UIT-R SM.337-6 Separaciones en Frecuencia y en Distancia.....	26
1.7.4	Comportamiento Teórico de Métodos de Análisis de Interferencia....	28
1.8	SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	29
1.8.1	Tipos de Datos SIG	29
2	METODOLOGÍA	32
2.1	FASES DE TRABAJO	32
2.2	REQUERIMIENTOS.....	33
2.2.1	Requerimientos Funcionales	33
2.2.2	Requerimientos No Funcionales.....	33
2.3	DISEÑO	34
2.3.1	Arquitectura	34
2.3.2	Infraestructura.....	35
2.3.3	Diseño de Pruebas	38
3	INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN	46
3.1	<i>RTL2832UR820T2</i> Y SU FUNCIÓN COMO RECEPTOR.....	46
3.2	TRANSMISOR FM PARA PRUEBAS DE LA PRIMERA ETAPA	47
3.2.1	Funcionamiento de la USRP B210	51
3.2.2	Cálculo de la Zona Lejana	52
3.3	TRANSMISOR PARA PRUEBAS DE LA SEGUNDA ETAPA.....	53
3.3.1	Trayectoria de Análisis 1: Bomba Coconuco	56
3.3.2	Trayectoria de Análisis 2: La Intersección	56
3.3.3	Trayectoria de Análisis 3: El Tránsito	57
3.3.4	Trayectoria de Análisis 4: Gran Colombia	58
3.3.5	Trayectoria de Análisis 5: El Cubo.....	58
3.3.6	Trayectoria de Análisis 6: Moscopan	59
3.3.7	Puntos Estratégicos Para el Análisis Experimental de las Áreas de Servicio60	
4	RESULTADOS	62
4.1	PRUEBAS DE LA PRIMERA ETAPA.....	62
4.2	PRUEBAS SERVICIO DE RADIO MÓVIL TERRESTRE	68

4.2.1	Análisis Experimental de Mínima Separación Espacial	68
4.2.2	Análisis Experimental de Áreas de Servicio en Sistemas Operando Entre 30 y 466 MHz	84
5	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	93
5.1	CONCLUSIONES.....	93
5.2	RECOMENDACIONES.....	95
5.3	TRABAJOS FUTUROS.....	95
	REFERENCIAS.....	96
	ANEXO A	99

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Antenas con visibilidad sobre la superficie terrestre.....	6
Figura 2. Geometría cálculos sobre tierra plana.....	7
Figura 3. Curvatura de la tierra.....	8
Figura 4. Perfil de terreno con corrección de radio terrestre.	10
Figura 5. Difracción de señales radioeléctricas.	11
Figura 6. Elipsoides de Fresnel.	11
Figura 7. Interferencia co-canal.....	17
Figura 8. Izquierda: Limitador de una etapa, derecha: Acción del limitador.	20
Figura 9. Representación gráfica de la relación de protección.....	21
Figura 10. Formato vectorial – Formato ráster.	30
Figura 11. Procedimiento de interpolación TIN.	31
Figura 12. Esquema metodológico.....	32
Figura 13. Fases metodológicas.	32
Figura 14. Arquitectura.....	34
Figura 15. Planteamiento del diseño de pruebas.	39
Figura 16. Arquitectura escenario preliminar.....	39
Figura 17. Esquema de pruebas primera etapa.	40
Figura 18. Esquema del escenario real planificado.....	41
Figura 19. Esquema de pruebas, segunda etapa.....	42
Figura 20. Elaboración experimental de un mapa de área de servicio.....	43
Figura 21. Procedimiento análisis experimental de áreas de servicio.	43
Figura 22. Dispositivo de recepción RTL2832U.	46
Figura 23. Interfaz del analizador de espectro SDRConsole.....	47
Figura 24. Desactivación de AGC y ganancia de RF estática.	47
Figura 25. Interfaz software Zadig.....	48
Figura 26. Esquema de bloques en GNURadio para el transmisor FM.....	48
Figura 27. Bloque WAV file source.....	48
Figura 28. Bloque de filtro pasa bajo.....	49
Figura 29. Bloque de filtro de preénfasis FM.....	49
Figura 30. Bloque de modulación NBFM.....	49
Figura 31. Bloque de retardo.....	50
Figura 32. Bloque de comunicación con dispositivo USRP.....	50
Figura 33. Equipo de transmisión configurado para la primera etapa.	50
Figura 34. Resultado de la transmisión desde el equipo B210.	51
Figura 35. Características de dispositivo B210 a la salida.	51
Figura 36. Esquema de despliegue del escenario real.....	53
Figura 37. Puntos de transmisión.....	54
Figura 38. Antena de recepción.	54
Figura 39. Radio transmisor.	55

Figura 40. Zonas de influencia del análisis experimental.	55
Figura 41. Trayectoria de análisis 1: Bomba Coconuco.	56
Figura 42. Trayectoria de análisis 2: La Intersección.	57
Figura 43. Trayectoria de análisis 3: El Tránsito.	57
Figura 44. Trayectoria de análisis 4: Gran Colombia.	58
Figura 45. Trayectoria de análisis 5: El Cubo.	59
Figura 46. Trayectoria de análisis 6: Moscopan.	60
Figura 47. Puntos de muestreo de potencia seleccionados.	60
Figura 48. Visualización de la señal recibida en 137 MHz.	62
Figura 49. Comportamiento de la propagación de la señal por frecuencias.	63
Figura 50. Gráfica de comportamiento inicial de las señales transmitidas.	64
Figura 51. Comportamiento de las señales con valores estables de relación portadora-interferencia en escenario preliminar.	66
Figura 52. Separación espacial del receptor por frecuencia central.	66
Figura 53. Zona de protección.	67
Figura 54. Esquema de aislamiento.	72
Figura 55. Cobertura experimental a 137 MHz contra el modelo de Espacio Libre.	84
Figura 56. Cobertura experimental a 162 MHz contra el modelo de Espacio Libre.	85
Figura 57. Cobertura experimental a 450 MHz contra el modelo de Espacio Libre.	85
Figura 58. Cobertura experimental a 456 MHz contra el modelo de Espacio Libre.	86
Figura 59. Cobertura experimental a 137 MHz contra el modelo Longley-Rice. ...	87
Figura 60. Cobertura experimental a 162 MHz contra el modelo Longley-Rice. ...	87
Figura 61. Cobertura experimental a 450 MHz contra el modelo Longley-Rice. ...	88
Figura 62. Cobertura experimental a 456 MHz contra el modelo Longley-Rice. ...	88

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Bandas de frecuencia.....	3
Tabla 2. Servicios de operación en VHF y UHF.....	4
Tabla 3. Servicios y ancho de banda requerido.....	5
Tabla 4. Exponente de propagación n	14
Tabla 5. Características del dispositivo B210.....	36
Tabla 6. Características transceptor BAOFENG.....	36
Tabla 7. Características RTL2832UR820T2.....	37
Tabla 8. Zonas lejanas para escenario preliminar.....	52
Tabla 9. Centro de monitoreo Bs.....	55
Tabla 10. Características estación Ms 1.....	56
Tabla 11. Características estación Ms 2.....	56
Tabla 12. Características de estación Ms 3.....	57
Tabla 13. Características de estación Ms 4.....	58
Tabla 14. Características de Ms 5.....	59
Tabla 15. Características de Ms 6.....	59
Tabla 16. Parámetros para la evaluación experimental de área de servicio.....	61
Tabla 17. Valores de nivel de potencia obtenidos de transmisión inicial.....	63
Tabla 18. Valores obtenidos al alejar el transmisor interferente.....	65
Tabla 19. Zonas de protección.....	67
Tabla 20. Valor promedio de potencia de recepción por trayectoria de análisis....	68
Tabla 21. C/I punto de transmisión: El Tránsito.....	70
Tabla 22. C/I punto de transmisión: Gran Colombia.....	71
Tabla 23. Mínima separación espacial: trayectoria El Tránsito.....	73
Tabla 24. Mínima separación espacial: trayectoria Gran Colombia.....	73
Tabla 25. Valores y parámetros utilizados en la comparación entre métodos analíticos y experimentales.....	74
Tabla 26. Valor de aislamiento teórico requerido.....	74
Tabla 27. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación de Espacio Libre.....	75
Tabla 28. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Okumura-Hata a 137 MHz.....	76
Tabla 29. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Okumura-Hata a 162 MHz.....	76
Tabla 30. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Okumura Hata a 450 MHz.....	76
Tabla 31. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Okumura Hata a 456 MHz.....	77
Tabla 32. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación de Dos Rayos.	77

Tabla 33. Pérdidas de referencia (Lo) obtenidas experimentalmente.	78
Tabla 34. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación de Pendiente Única a 137 MHz.....	78
Tabla 35. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación de Pendiente Única a 162 MHz.....	78
Tabla 36. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación de Pendiente Única a 450 MHz.....	79
Tabla 37. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación de Pendiente Única a 456 MHz.....	79
Tabla 38. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Egli a 137 MHz.....	80
Tabla 39. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Egli a 162 MHz.....	80
Tabla 40. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Egli a 450 MHz.....	80
Tabla 41. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Egli a 456 MHz.....	81
Tabla 42. Mínimas separaciones elegidas por modelo de pérdidas.....	81
Tabla 43. Pérdidas por propagación transmisores deseados.	82
Tabla 44. Separación entre emplazamiento El Tránsito y receptor víctima.....	82
Tabla 45. Separación entre emplazamiento Gran Colombia y receptor víctima....	82
Tabla 46. Mínimo aislamiento entre estaciones base para trayectoria El Tránsito.	83
Tabla 47. Mínimo aislamiento entre estaciones base para trayectoria Gran Colombia.	83
Tabla 48. Niveles de señal medidos a 137 MHz.	89
Tabla 49. Niveles de señal medidos a 162 MHz.	90
Tabla 50. Niveles de señal medidos a 450 MHz.	91
Tabla 51. Niveles de señal medidos a 456 MHz.	92

LISTA DE ACRÓNIMOS

AGC	<i>Automatic Gain Control</i> , Control Automático de Ganancia.
ANE	Agencia Nacional del Espectro.
CNABF	Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias.
D/U	<i>Desired to Undesired</i> , Relación Señal Deseada a no Deseada.
DEG	Grados Sexagesimales.
FDR	<i>Frequency Dependent Rejection</i> , Rechazo Dependiente de la Frecuencia.
FM	Frecuencia Modulada.
GIS	<i>Geographical Information System</i> , Sistema de Información Geográfica.
ITM	<i>Irregular Terrain Model</i> , Modelo de Terreno Irregular.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
LOS	<i>Line Of Sight</i> , Línea de Vista.
LP	Longitud de Protección.
MC	Monte-Carlo.
MCL	<i>Minimum Coupling Loss Method</i> , Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento.
MinTIC	Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones.
MSNM	Metros Sobre el Nivel del Mar.
NBFM	<i>Narrow Band Frequency Modulation</i> , Modulación en Frecuencia de Banda Estrecha.
NLoS	<i>Non Line-Of-Sight</i> , Sin Línea de Vista
OCR	<i>Off Channel Rejection</i> , Rechazo Fuera de Canal.
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente.
PRA	Potencia Radiada Aparente.
RMS	<i>Root Medium Square</i> , Error Cuadrático Medio.
RMS	<i>Root Medium Square</i> , Raíz Cuadrática Media.
RS	Radio de Servicio.
SDR	<i>Software Defined Radio</i> , Radio Definida por Software.
SIG	Sistema de Información Geográfica
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i> , Red Irregular Triangulada.
TTP	<i>Push to Talk</i> , Pulse Para Hablar.

UHF	<i>Ultra High Frequency</i> , Ultra Altas Frecuencias.
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i> , Periférico Radio de Software Universal.
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i> , Universal Transversal de Mercator
VHF	<i>Very High Frequency</i> , Muy Altas Frecuencias.
ZP	Zona de Protección

INTRODUCCIÓN

La evolución de las tecnologías inalámbricas se da como una respuesta a las exigencias de los usuarios y empresas, que han generado un incremento en el uso de los servicios inalámbricos que se prestan en las diferentes bandas de frecuencia, aumentando la demanda en la asignación de frecuencias a nivel nacional, lo que implica mayor uso del espectro radioeléctrico; por lo tanto, es conveniente una gestión eficiente de este recurso en Colombia. Es responsabilidad de los diferentes organismos de control brindar el acceso a este recurso de manera equitativa, razón por la cual; como deber y atribución constitucional en Colombia, existen organismos regulatorios como el MinTIC (Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones) que a través de la ANE (Agencia Nacional del Espectro) se aseguran de gestionar, vigilar y controlar de manera técnica los recursos del espectro electromagnético disponibles [1], haciendo uso de separación de la frecuencia y distancia, permitiendo de esta manera el reuso de las frecuencias.

Dentro del espectro radioeléctrico existen las bandas de frecuencias VHF (*Very High Frequency*) y UHF (*Ultra High Frequency*), este segmento del espectro es bastante utilizado debido a las características favorables para las telecomunicaciones como son: las bajas pérdidas de propagación, el gran alcance y el elevado despliegue de la tecnología para los diferentes servicios, tales como: radiodifusión, radio móvil analógica y digital, transmisión de televisión analógica o digital terrestre; los servicios de radio móvil tienen una alta demanda en el territorio colombiano, razón por la cual se hace necesario un estudio del aislamiento para sistemas de telecomunicaciones radio móvil en el rango de 30 MHz a 466 MHz.

Para realizar el estudio del alcance de los sistemas de telecomunicación y la interferencia que pueden causar a otros sistemas, se hace uso de diferentes métodos analíticos como son: el Método de Mínimas Pérdidas por Acoplamiento (MCL, *Minimum Coupling Loss*) y su versión mejorada (E-MCL, *Enhanced Minimum Coupling Loss*) [2]; también el Método Analítico de la Recomendación ITU-R SM.337 [3]. Estos métodos permiten estimar la máxima potencia recibida de señal no deseada en el sistema víctima de interferencia, lo que posteriormente se traduce en la mínima separación en distancia (aislamiento) por medio de diferentes modelos de pérdidas de propagación; estos modelos calculan sus pérdidas basados en las características de los elementos involucrados en el enlace radio; sin embargo, estos modelos analíticos tienen un determinado margen de error, generando distancias de aislamiento superiores a las necesarias realmente, ya que se omiten factores orográficos del medio que afectan a los sistemas de telecomunicaciones, siendo necesario evaluar la interferencia desde un enfoque experimental que permita tener una mejor aproximación al momento de hacer el estudio del área de servicio e interferencia en los sistemas de interés.

Una solución al creciente uso de las frecuencias en las bandas VHF y UHF es el reuso de frecuencias; sin embargo, los métodos ya mencionados hacen que este

proceso de reutilización sea viable para distancias de separación muy elevadas entre sistemas de telecomunicaciones operando a la misma frecuencia; debido a que el análisis de aislamiento se basa en esperar el peor de los casos de interferencia posible, haciendo poco eficiente el uso de espectro radioeléctrico disponible. Otro factor que genera un uso inadecuado al espectro es la estimación de cobertura de los sistemas de telecomunicaciones desplegados dentro del rango de frecuencias de 30 MHz a 466 MHz, ya que los modelos de pérdidas de propagación empíricos utilizados, no consideran todos los obstáculos presentes en la orografía, los cuales afectan de forma indirecta o directa la señal transmitida, dificultando la capacidad de estimar áreas de servicio para los sistemas de telecomunicaciones.

Este trabajo de grado proporciona, a través de toma de datos e interpolación con software soportado en sistemas de información geográfica (GIS, *Geographical Information System*) [4], áreas de servicio experimentales en una determinada zona orográfica colombiana. También, mediante procedimientos experimentales busca encontrar una distancia de aislamiento que permita a sistemas de telecomunicaciones radio móvil operar a la misma frecuencia sin interferirse entre sí, en el rango de 30 MHz a 466 MHz.

A continuación, se describen las bases teóricas que brindan apoyo al trabajo de grado el cual es de carácter experimental. Para esto, es necesario partir de la información ya existente acerca del comportamiento de las comunicaciones inalámbricas en las bandas de frecuencia de interés, con el objetivo de brindar veracidad a los resultados encontrados producto del análisis experimental.

1 CONCEPTUALIZACIÓN

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados para el trabajo de grado, es importante tener conocimiento de los conceptos teóricos que permiten sentar las bases para los procedimientos experimentales en su desarrollo.

1.1 ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

El espectro radioeléctrico es el segmento del espectro electromagnético¹ usado en el campo de las radiocomunicaciones o comunicaciones inalámbricas, el cual está dividido en bandas de frecuencias (Tabla 1) [6]. Las bandas de frecuencias ubicadas en los rangos de 30 MHz – 300 MHz (VHF) y de 300 MHz – 466 MHz (UHF), son los rangos de frecuencia seleccionados para el desarrollo del proyecto; esto debido al interés particular de analizar los sistemas de telecomunicaciones que brindan servicios de radio móvil² convencional.

Tabla 1. Bandas de frecuencia.

Fuente: Tomado de [8].

Bandas	Frecuencia	Uso
VLF	3 - 30 KHz	Comunicaciones de radionavegación de largo alcance y estratégicas
LF	30 - 300 KHz	Comunicaciones de radionavegación de largo alcance y estratégicas
MF	0,3 - 3 MHz	Radiodifusión y móvil marítimo
HF	3 - 30 MHz	Radiodifusión global, móvil
VHF	30 - 300 MHz	Radiodifusión de audio y video, comunicaciones personales
UHF	0,3 - 3 GHz	Radiodifusión de audio y video, comunicaciones personales, comunicaciones por satélite
SHF	3 - 30 GHz	Radiodifusión de audio y video, LAN, comunicaciones personales, comunicaciones por satélite
EHF	30 - 300 GHz	Micro celular, LAN, comunicaciones personales, comunicaciones por satélite

¹ Espectro electromagnético: Es el conjunto de todas las frecuencias a las que se puede producir radiación electromagnética y por la que a través de medios guiados (fibra óptica, coaxial) y no guiados (espacio, vacío) se puede transmitir información [5].

² Un sistema de telecomunicaciones móvil se puede definir como un conjunto de redes y servicios que permiten a los usuarios transmitir voz entre ellos, permitiendo la movilidad de los usuarios entre el establecimiento de una conexión y durante la misma [7].

1.1.1 Servicios Prestados en las Bandas de Interés

La ANE, a través del CNABF (Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias) se encarga de determinar que tipos de servicios se manejan en determinados bloques y bandas de frecuencias, en la Tabla 2 se enumeran servicios en el rango de frecuencias de interés para este trabajo de grado [9].

Tabla 2. Servicios de operación en VHF y UHF.

Fuente: Tomado de [9].

Frecuencias	Servicio	Frecuencias	Servicio
30 - 50 MHz	Comunicaciones fijas - móvil	400 - 410 MHz	Móvil satelital
50 - 54 MHz	Radioaficionados	430 - 440 MHz	Radioaficionados
54 - 72 MHz	Radiodifusión	440 - 450 MHz	Radiolocalización
76,8 - 108 MHz	Radiodifusión	450 - 455 MHz	Móvil - fijo
137 - 162 MHz	Móvil Móvil marítimo Móvil aeronáutico Móvil por satélite Servicio fijo	455 - 456 MHz	Móvil satelital
220 - 322 MHz	Móvil-fijo	456 - 459 MHz	Móvil-fijo
322 - 390 MHz	Comunicaciones móviles y fijas	466 - 470 MHz	Meteorología por satélite (tierra - aire)

1.1.2 Ancho de Banda

El ancho de banda de una señal es la diferencia entre las frecuencias máxima y mínima contenidas en la información. Por su parte, el ancho de banda de un canal de comunicaciones es la diferencia entre la frecuencia máxima y mínima que pueden pasar por el canal, por lo tanto, el ancho de banda de canal debe ser suficientemente grande para que puedan pasar todas la frecuencias importantes de la información [10]. En la Tabla 3 se puede observar el ancho de banda de algunos servicios.

Tabla 3. Servicios y ancho de banda requerido.

Fuente: Tomado de [9].

Frecuencias	Anchos de banda	Servicios
30 – 466 MHz	6,25 KHz – 12,5 KHz – 25 KHz – 50 KHz	Radio móvil convencional
88 – 108 MHz	75 KHz	Radio difusión sonora

1.2 MODOS DE TRANSMISIÓN

La comunicación entre un emisor y receptor, se puede establecer en una sola dirección, en ambas direcciones e incluso transmitir y recibir al mismo tiempo, los cuales se les conoce como modos de transmisión o de explotación del canal [10].

1.2.1 Modo Simplex

La comunicación se presenta en un solo sentido, es decir, el transmisor emite una señal, que es captada por un receptor; pero el receptor es incapaz de comunicarse con el transmisor. Por ejemplo, radiodifusión sonora y televisión.

1.2.2 Modo Semidúplex

Para este modo de comunicación se puede establecer un enlace de comunicación en ambas direcciones, lo que indica que cada estación puede ser un transmisor o un receptor, pero no puede ser ambas a la vez. Por ejemplo, los radios que brindan el servicio de radio móvil terrestre son capaces de recibir y transmitir una señal a través de una frecuencia portadora, para acceder al modo de transmisión se utiliza un botón, lo que se conoce como PTT (*Push To Talk*).

1.2.3 Modo Dúplex

Este modo de comunicación el enlace de transmisión funciona en ambos sentidos, con la diferencia que las estaciones pueden transmitir y recibir al mismo tiempo, un ejemplo son los sistemas de telefonía fija y móvil.

1.3 RELEVANCIA RADIOELÉCTRICA DEL TERRENO EN EL MEDIO DE TRANSMISIÓN

El comportamiento de una onda radioeléctrica cuando se desplaza por el espacio depende de las condiciones existentes en el trayecto. En casos reales cuando una onda viaja por un medio de transmisión, pueden existir elementos que causan

reflexiones³ de la onda. Esta situación se puede visualizar en la transmisión que hace una antena a otra estando situadas sobre la superficie terrestre con visibilidad directa, en donde se representa con un rayo directo y uno reflejado en el suelo [12] como se ve en la Figura 1.

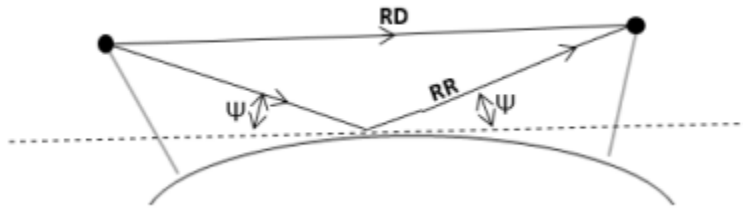


Figura 1. Antenas con visibilidad sobre la superficie terrestre.
Fuente: Tomada de [13].

El valor de campo recibido en la antena receptora esta dado por la ecuación general de propagación:

$$e = e_0[1 + R \exp(-j\Delta) + (1 - R)A \exp(-j\Delta)], \quad (1)$$

donde:

- e : Intensidad de campo en el receptor (V/m).
- e_0 : Intensidad de campo en condiciones de espacio libre (V/m).
- A : Terminio de atenuación asociado a la onda de superficie.
- R : Coeficiente de reflexión del suelo, el cual está definido en la ecuación 2.

$$R = |R|e^{-j\beta}, \quad (2)$$

donde $|R|$ y β están en función de la frecuencia, polarización características del suelo y ángulo de incidencia Ψ .

- Δ : Ángulo de desfase entre componente directa RD y componente reflejada RR dado por la ecuación 3.

$$\Delta(rad) = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda}, \quad (3)$$

donde Δl (m) es la diferencia de recorrido entre el rayo directo y el reflejado y λ (m) es la longitud de onda de la señal.

³ Reflexión es el fenómeno que se presenta cuando una señal cambia de dirección dentro del mismo medio por el que se propaga, esto principalmente debido a las múltiples capas presentes en la atmosfera [11].

1.3.1 Propagación Sobre Tierra Plana

Si el enlace de comunicación inalámbrico se realiza a unas pocas decenas de kilómetros, se puede despreciar la curvatura de la tierra y asumir una superficie plana y reflectora [11], como se ve en la Figura 2, donde h_t (m) es la altura de la antena sobre la superficie de la tierra, h_r (m) es la altura de la antena receptora sobre la tierra, d (m) es la distancia entre el transmisor y el receptor y Ψ (DEG) es el ángulo de incidencia del rayo en el suelo.

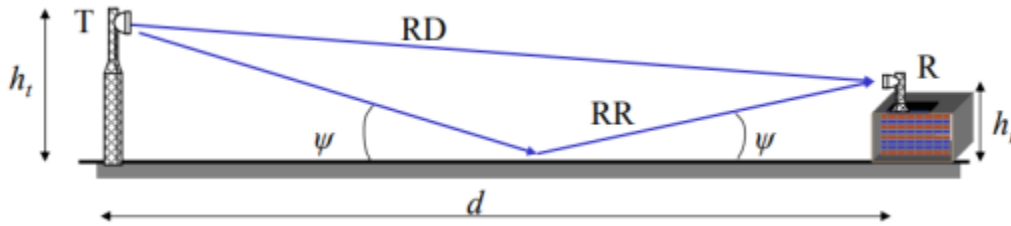


Figura 2. Geometría cálculos sobre tierra plana.

Fuente: Tomada de [12].

Mediante las siguientes consideraciones geométricas se obtiene las siguientes expresiones:

$$\Psi(DEG) = \arctan\left(\frac{h_t + h_r}{d}\right), \quad (4)$$

$$\Delta l(m) = TPR - TR \approx \frac{2h_t h_r}{d}, \quad (5)$$

donde:

$\Psi(DEG)$: Ángulo de incidencia.
 $\Delta l(m)$: Diferencia de trayectos.
 TPR : Trayecto del rayo reflejado.
 TR : Trayecto del rayo directo.

Es así como la diferencia de fases entre ambos trayectos está dada por

$$\text{Desfasamiento: } \Delta(rad) = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}. \quad (6)$$

1.3.2 La Troposfera en la Propagación

En frecuencias superiores a 30 MHz los modos de propagación de onda de superficie no son válidos, ya que en las comunicaciones terrestres las señales no viajan en el espacio ideal, si no que viajan a través de la atmósfera, es por esto que se deben tener en cuenta otros fenómenos de propagación [11]. Para los sistemas de telecomunicaciones que transmiten en las bandas VHF y UHF, sus señales

viajan a través de las capas bajas de la atmósfera terrestre en la denominada zona de troposfera. Es por esto que es importante conocer las características del medio y la trayectoria que toma la onda, sobre todo la posición de la onda respecto a la orografía⁴ del medio de transmisión, ya que elementos orográficos pueden interceptar el rayo directo de la señal generando altas pérdidas por atenuación [15].

1.3.3 Factor de Curvatura de la Tierra

En un sistema de comunicación inalámbrico que transmite a larga distancia, las ondas que viajan a través de la troposfera experimentan refracción⁵ a causa de la no uniformidad de las capas atmosféricas, esto se manifiesta con una variación del índice de refracción⁶ con la altura, debido principalmente a variaciones de temperatura y presión atmosférica. A consecuencia de la refracción, la trayectoria del rayo directo no es recta, si no que su propagación se da de manera curvilínea. Adicionalmente se debe tener presente la curvatura de la tierra, sobre todo en enlaces de larga distancia, en donde los accidentes geográficos tienen una mayor incidencia negativa sobre la propagación, hasta el punto de que puede definirse un horizonte radioeléctrico por encima del cual se crea una sombra en donde no es posible la comunicación [11], como se muestra en la Figura 3.

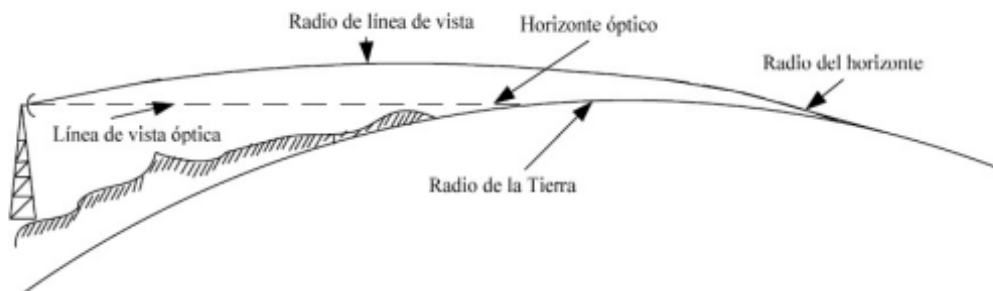


Figura 3. Curvatura de la tierra.
Fuente: Tomada de [11].

Los efectos de refracción y curvatura terrestre contribuyen en la influencia que pueden generar los obstáculos que se encuentran en el medio por el cual viaja la onda, una de esas contribuciones es debido a la curvatura terrestre, ya que gracias a ésta aumenta la altura efectiva de los obstáculos, esto sin tener en cuenta la ganancia o pérdida de altura que pueden tener los obstáculos debido a la refracción troposférica. Estos efectos pueden corregirse a través del modelo de tierra curva, en donde el radio de la tierra se multiplica por un factor de radio conocido como

⁴ Orografía: descripción y representación del relieve terrestre (cordilleras, valles y fallas geográficas) [14].

⁵ Refracción es el fenómeno por el cual una señal experimenta cambios en su dirección y velocidad al pasar de un medio a otro con distinto índice de refracción[13].

⁶ Índice de refracción es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio cuyo índice se calcula[13].

factor K [16], el cual está definido como la relación entre el radio real de la tierra, R_0 , y el radio de la curvatura del haz, R , que está dado por la ecuación (7).

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R'} \quad (7)$$

$$\frac{1}{KR_0} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R'} \quad (8)$$

$$K = \frac{R}{R - R_0}, \quad (9)$$

donde R_0 es el radio real de la tierra (Km), aproximadamente 6370 Km, R_e es el radio ficticio de la curvatura de la tierra y R es la curvatura del haz, está definido por la ecuación 10.

$$R = \frac{-10^6}{\Delta N}, \quad (10)$$

donde ΔN es el gradiente vertical del co-índice en la capa inferior de la atmosfera y viene dado por la ecuación 11.

$$\Delta N = N_s - N_1, \quad (11)$$

donde, N_s es la refractividad en la superficie terrestre y N_1 es la refractividad a 1 kilómetro de altura sobre la superficie terrestre, los cuales pueden ser calculados mediante la siguiente expresión:

$$N_s(h) = N_0 \exp(-0,136h), \quad (12)$$

donde N_0 es el valor medio de la refractividad atmosférica extrapolada al nivel del mar y h (Km) la altura sobre el nivel del mar del punto de la superficie terrestre en el que se calcula la refractividad.

De las ecuaciones 9,10,11 y 12 se obtiene la siguiente expresión del factor K

$$K = \frac{157}{157 + \Delta N} \quad (13)$$

De acuerdo con la recomendación ITU-R P.453-14 [17], para climas templados como el de la región colombiana se tiene un ΔN de -39, sustituyendo este valor en la ecuación 13, se obtiene un valor de $K = \frac{4}{3}$.

1.3.3.1 Corrección de Altura de los Obstáculos

La refracción y la curvatura de la tierra afectan la altura de los obstáculos a lo largo de la trayectoria de una señal, para modelar este fenómeno se utiliza el factor de corrección K [13], en la Figura 4 se observa el efecto de este factor en la altura de los obstáculos. En donde x (m) es la distancia del transmisor a un punto, d (m) es la distancia de longitud del enlace $c(x)$ (m) es la altura del terreno sobre el nivel del mar, $f(x)$ (m) es la protuberancia de la tierra, $z(x)$ (m) es la altura del terreno sobre la base $Y_r(x)$ (m) es la altura del rayo sobre la base.

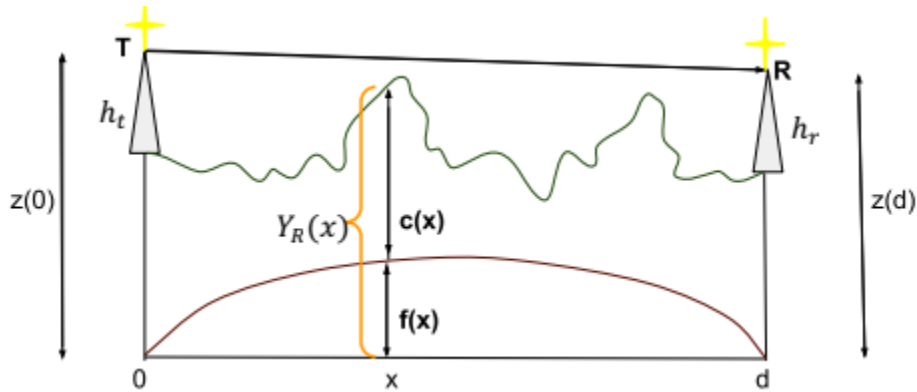


Figura 4. Perfil de terreno con corrección de radio terrestre.
Fuente: Tomado de [13].

La protuberancia de la tierra $f(x)$ es el valor de altura que se debe adicionar al obstáculo y se obtiene mediante la ecuación:

$$f(x) = 0,07849 \frac{x(d-x)}{K}, \quad (14)$$

donde para Colombia $K = \frac{4}{3}$.

1.3.4 Propagación por Difracción

La difracción es un fenómeno característico de las ondas, el cual le permite propagarse alrededor de los obstáculos de dimensiones similares a su longitud de onda. Cuando la onda choca con el obstáculo, éste se convierte en un nuevo foco emisor. En medios de transmisión con gran cantidad de fallas orográficas, la difracción juega un papel importante en la propagación de la onda, y se da cuando la trayectoria entre el transmisor y el receptor tienen múltiples obstáculos los cuales afectan el rayo directo de la señal [13], en la Figura 5 se observa cómo se desplazan las ondas por difracción.

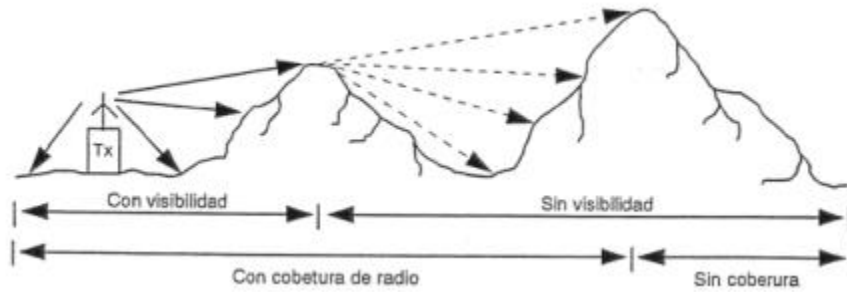


Figura 5. Difracción de señales radioeléctricas.
Fuente: Tomada de [18].

En general el fenómeno de la difracción se rige por el principio de Huygens, en el cual cada elemento de un frente de onda se comporta como una fuente puntual de ondas esféricas secundarias.

1.3.4.1 Zonas de Fresnel

Existen múltiples formas en las que una señal puede viajar de un transmisor a un receptor, ya sea directamente entre los elementos involucrados o reflejándose en el suelo; sin embargo, la antena receptora no puede diferenciar la señal principal de las señales reflejadas, las cuales al incidir sobre la antena se combinan, lo cual aumenta el nivel de señal recibida si la onda directa y la onda reflejada llegan en fase, o por el contrario se pueden anular completamente si llegan en contrafase, a través de las zonas de Fresnel (Figura 6) se pueden determinar si los obstáculos del trayecto generan ondas en fase y contrafase entre el receptor y el transmisor [19].

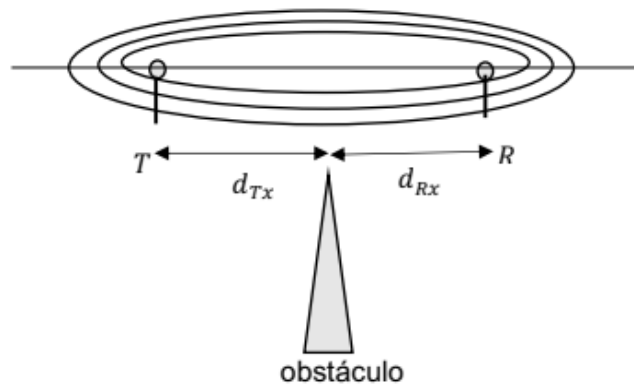


Figura 6. Elipsoides de Fresnel.
Fuente: Tomado de [13].

donde:

T : Transmisor.

d_{Tx} : Distancia entre el emisor y el obstáculo.

d_{Rx} : Distancia entre el obstáculo y el receptor.

R : Receptor.

1.4 MODELOS DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN

Un modelo de pérdidas de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar el comportamiento radioeléctrico de un medio de transmisión dado. Estos modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos o una combinación de estos dos [20]. Existen múltiples modelos de propagación, la mayoría de ellos diseñados a partir de entornos específicos y para determinado tipo de comunicaciones, aunque su objetivo final es que puedan ser utilizados en cualquier entorno con el fin de predecir el nivel de reducción de la señal transmitida, no siempre logran adaptarse de manera eficiente a medios de transmisión donde nunca se probaron, a continuación, se enumeran algunos modelos de propagación en comunicaciones inalámbricas, los cuales se pueden desplegar en las bandas de interés.

1.4.1 Cálculo de Atenuación en Espacio Libre

Este modelo considera al medio de transmisión como un espacio en el que no existen obstáculos, ni existen efectos de reflexión o difracción de la señal, se usa como marco de referencia ya que no toma en cuenta los parámetros de las antenas y los factores ambientales del medio en donde se realiza el análisis. La ecuación 15 permite calcular las pérdidas de propagación en espacio libre [21].

$$l_p(dB) = 32,45 + 20 \log[f(MHz)] + 20 \log[d(Km)], \quad (15)$$

donde:

$l_p(dB)$: Pérdida de propagación.

f : Frecuencia (MHz).

d : Distancia (Km).

1.4.2 Modelo de Dos Rayos

Este modelo se basa en óptica geométrica, describe las pérdidas de propagación tomando en cuenta la transmisión directa, así como una señal de propagación reflejada en la tierra entre el transmisor y el receptor [22].

Las pérdidas de propagación (l_p) se pueden evaluar con la ecuación 16

$$l_p(dB) = 40 \log d - (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r), \quad (16)$$

donde:

d : Distancia en kilómetros.

G_t : Ganancia de la antena trasmisora.

G_r : Ganancia de antena receptora.

h_t : Altura de la antena transmisora en metros.

h_r : Altura de la antena receptora en metros.

1.4.3 Modelo de Okumura-Hata

Es un modelo empírico, desarrollado por Masaharu Hata producto de asimilar la información del estudio hecho por Yoshihisa Okumura, este modelo es propicio en las bandas VHF y UHF, desde los 150 MHz a los 1500 MHz, la diferencia entre el modelo Okumura y Okumura-Hata es la forma que analiza sus pérdidas de propagación en área urbana a través de una formula estándar [23].

El modelo de propagación fue elaborado para tres escenarios diferentes, urbano, semi urbano y rural, en donde interviene un factor de corrección el cual está determinado por el tipo de área, la altura de la antena y la frecuencia de operación. Para zona urbana, las pérdidas por propagación se definen en la ecuación 17.

$$L_{urbana}(dB) = 69,55 + 26,16\log f_c - 13,82\log h_{te} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55\log h_{te})\log d. \quad (17)$$

Además, se deben tener en cuenta las siguientes condiciones:

$$150 \text{ MHz} < f_c < 1500 \text{ MHz}, \quad (18)$$

$$30 \text{ m} < h_{te} < 300 \text{ m}, \quad (19)$$

$$1 \text{ m} < h_{re} < 10 \text{ m}, \quad (20)$$

donde:

f_c : Frecuencia portadora en MHz.

h_{te} : Altura de la antena transmisora en metros.

h_{re} : Altura de la antena receptora en metros.

$a(h_{re})$: Factor de corrección dependiente del tipo de área de servicio.

d : Distancia entre transmisor y receptor.

En ciudades grandes:

- Para $f_c < 300 \text{ MHz}$

$$a(h_{re}) = 8,29[\log(1,54h_{re})]^2 - 1,1. \quad (21)$$

- Para $f_c > 300 \text{ MHz}$

$$a(h_{re}) = 3,2[\log(11,75h_{re})]^2 - 4,97. \quad (22)$$

En ciudades medianas:

$$a(h_{re}) = (1,1\log f_c - 0,7)h_{re} - 1,56\log f_c + 0,8. \quad (23)$$

1.4.4 Modelo de Propagación de Pendiente Única

Este modelo permite estimar pérdidas por propagación, tomando en cuenta en su expresión matemática exclusivamente la distancia entre el transmisor y el punto a ser evaluado, su ecuación está dada por

$$L_b = L_0 + 10n\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (24)$$

donde d_0 es una distancia de referencia en la cual ya es conocida la pérdida de propagación y L_0 es el valor de pérdida de referencia en la distancia conocida. Los valores de referencia se pueden obtener de forma experimental y dependen del ambiente de propagación, n representa el exponente de propagación, el cual se observa en la Tabla 4 [24].

Tabla 4. Exponente de propagación n .

Escenario	Valor de n
Espacio libre	2
Urbano	2,7 - 3,5
Urbano con grandes edificios	3 - 5
Suburbano	2 - 3

1.4.5 Modelo de Propagación Egli

Este modelo fue desarrollado por John Egli en 1957, dando una mejora al modelo de tierra plana existente, a fin de realizar mediciones de potencia sobre señales de transmisión que operan en VHF/UHF en rangos de frecuencia que van desde 40 MHz hasta 1 GHz, concluyendo en la ecuación 25 [25].

$$L_p = 40 \log(d) - 20 \log(h_t) + 20 \log(f) + lm', \quad (25)$$

$$lm' = 85,9 - 20 \log(h_r), \quad (26)$$

donde:

f : Frecuencia (MHz).

h_t : Altura antena estación base (m).

h_r : Altura antena estación receptora (m).

d : Distancia entre antenas (m).

1.4.6 Modelo de Propagación de Longley-Rice

Conocido también como Modelo de Terreno Irregular (ITM, *Irregular Terrain Model*), utilizado herramientas software de predicción de cobertura y análisis de interferencia en las bandas VHF y UHF, este modelo es de gran importancia debido a que recopila información de múltiples escenarios geográficos.

Se basa en la teoría electromagnética y en el análisis estadístico tanto de las características físicas del terreno como de las señales radioeléctricas, estimando un valor medio de atenuación de la señal transmitida basándose en la distancia y las variaciones de espacio y tiempo; toma en cuenta efectos como el de refracción y difracción, siendo de los más utilizados por la rigurosidad que tiene con el terreno donde es implementado [13].

1.5 FENÓMENOS PRESENTES EN LA PROPAGACIÓN

En todo sistema de comunicación se presentan diferentes tipos de fenómenos que afectan de manera directa o indirecta las propiedades originales de la señal transmitida, éstos pueden causar problemas en la información útil transportada en los enlaces, a continuación, se enumeran algunos de los más relevantes fenómenos y sus efectos, con el objetivo de analizar su impacto en el análisis experimental a realizar.

1.5.1 Ruido

El ruido es una señal eléctrica indeseable en los sistemas de telecomunicaciones, de tipo aleatoria en fase y amplitud, la cual no aporta información útil y no puede ser eliminada de los sistemas de telecomunicaciones, sin embargo, puede ser atenuado a niveles tolerables. En la naturaleza existen dos tipos de ruido, el artificial y natural [26].

El ruido artificial se presenta debido a la actividad humana, se origina en dispositivos eléctricos, electrónicos y maquinas eléctricas. La interferencia se encuentra dentro de este tipo de ruido. Además, está el ruido natural que es producido por los propios componentes electrónicos de un circuito o sistema y por los fenómenos naturales que se presentan en el entorno.

De forma resumida se puede definir al ruido como un fenómeno natural, inevitable e incontrolable. Este fenómeno siempre está presente en cualquier sistema de telecomunicaciones, el cual genera deterioro de la señal deseada a la entrada del receptor. La recomendación ITU-R P.372 brinda información acerca de los niveles de ruido externo tolerables para estaciones receptoras en el rango de frecuencia de 0,1 Hz a 100 GHz [27].

1.5.2 Interferencia

Este fenómeno se presenta cuando los sistemas de telecomunicaciones operan a frecuencias o distancias muy cercanas. Una señal no deseada (sistema interferente) afecta o altera la recepción de una señal deseada, como consecuencia, la señal que capta el receptor puede verse atenuada, no ser la señal esperada, estar distorsionada y, en el peor de los casos, se puede perder la información transmitida desde la fuente deseada, afectando las comunicaciones [28]. Debido a que el espectro radioeléctrico es un recurso limitado y que la interferencia afecta el uso eficiente éste, es necesaria una correcta parametrización del sistema para evitar la interferencia o reducirla a niveles tolerables, teniendo en cuenta factores como la asignación de frecuencias centrales, tipo de emisión, modulación, el nivel de potencia de transmisión y las características de la antena.

La señal deseada se puede ver afectada principalmente por 4 modos de interferencia: co-canal, de canal adyacente, desensibilización o bloqueo y la intermodulación. Con la ecuación 27 se calcula el nivel de interferencia en el receptor [3],

$$I = P_t + G_t + G_r - L_h(d) - FDR(\Delta f), \quad (27)$$

donde:

- I : Nivel de interferencia (dBW).
- P_t : Potencia de transmisión del transmisor interferente.
- G_t : Ganancia de la antena interferente en dirección del receptor (dBi).
- G_r : Ganancia de la antena receptora en dirección del interferente (dBi).
- $L_h(d)$: Pérdida de propagación debido a la distancia.
- $FDR(\Delta f)$: Rechazo dependiente de la frecuencia [3].

Debido a que un sistema real está afectado por más de una interferencia, la interferencia total se da como la suma de todas las interferencias relevantes y presentes en el sistema de telecomunicaciones, por lo tanto, la interferencia total está dada por la ecuación (28) [29].

$$I: I_1 + I_2 + \dots + I_k. \quad (28)$$

1.5.2.1 Interferencia Co-canal.

La interferencia co-canal (Figura 7) se presenta cuando existe una o varias señales no deseadas, operando en la misma frecuencia y dentro del ancho de banda en el que funciona el receptor [29]. Una de las causas comunes de la interferencia co-canal es el poco distanciamiento en espacio entre sistemas de comunicación operando a la misma frecuencia, aunque el reúso mejora la eficiencia en el uso del espectro, se debe garantizar con un mínimo aislamiento entre los sistemas involucrados [30]. Ya que en esta situación tanto la señal deseada como la interferente se superponen, el factor de Rechazo Dependiente de la Frecuencia (FDR, *Frequency Dependent Rejection*)⁷ es igual a cero [3], este factor es una medida que ayuda a caracterizar el nivel de interferencia en el receptor, por lo tanto, identifica, a través de una curva de selectividad en el receptor, la capacidad de rechazar señales interferentes. Entonces, si es cero implica que el receptor no tiene la capacidad de rechazar el espectro proveniente del transmisor interferente, lo que no permite filtrar la señal interferente a través de medios normales. El nivel de interferencia co-canal depende de las características de rechazo co-canal que posea el receptor, así como las características del transmisor y de la separación espacial que exista entre sistemas de comunicación operando a la misma frecuencia central.

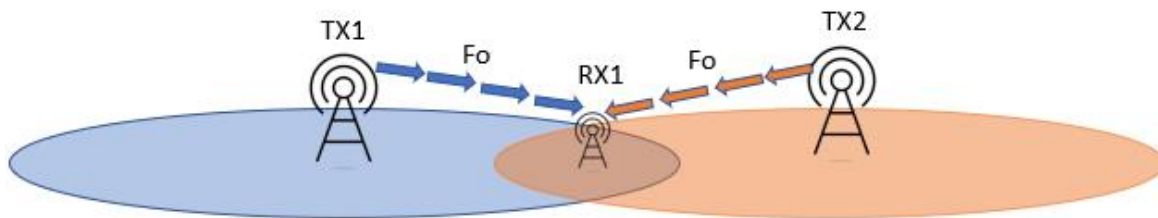


Figura 7. Interferencia co-canal.

1.5.2.2 Interferencia de Canal Adyacente

Este tipo de interferencia se presenta debido a una señal que está operando en un canal adyacente, la relevancia de este tipo de interferencia en el receptor depende de la capacidad de rechazo o filtrado que posea el mismo. Las principales causas de este tipo de interferencia son: un valor de separación frecuencia-distancia demasiado próximo, una relación de protección mal establecida, así como las características del receptor o incluso una interacción de todas las anteriores.

La separación frecuencia-distancia es un factor determinante en la interferencia por canal adyacente, en función de las frecuencias asignadas, a medida que su separación en frecuencia es mayor, la distancia de separación entre receptor e

⁷ FDR se puede entender como un rechazo dependiente de la frecuencia, es una medida del rechazo producido por la curva de selectividad del receptor en un espectro de emisión del transmisor no deseado [3].

interferente se reduce. También con el objetivo de respetar la relación de protección entre la señal deseada y la interferente

Teniendo en cuenta un valor máximo de interferencia aceptable I_M para un receptor, dicha interferencia de canal adyacente es aceptable, si y solo si, se cumple la siguiente relación de la ecuación (29) [29].

$$L_b(d) + FDR(\Delta f) \geq P_t + G_t + G_r - I_M, \quad (29)$$

donde:

$L_b(d)$: Pérdidas debido a la distancia entre el receptor y la interferencia.

P_t : Potencia de transmisión del interferente.

G_t : Ganancia de la antena interferente.

G_r : Ganancia de la antena receptora.

I_M : Interferencia mínima aceptable.

$FDR(\Delta f)$: Factor de rechazo dependiente de la frecuencia.

1.5.2.3 Desensibilización

Es un tipo de interferencia de canal adyacente, ocurre cuando un transmisor interferente opera a una distancia física muy cercana del receptor, o cuando la potencia de la señal interferente es lo suficientemente fuerte puede llevar a un modo de saturación al receptor, esto se ve reflejado en una atenuación o rechazo de la señal deseada.

El nivel de rechazo de la desensibilización depende de la capacidad del receptor para resistir las señales con potencia alta, este nivel de resistencia está condicionado por la separación que exista entre la frecuencia central en la que opera el receptor y la frecuencia central de la señal interferente [29].

1.5.2.4 Intermodulación

Los productos de intermodulación se pueden generar debido a las no linealidades del amplificador de potencia de radiofrecuencia en la salida del transmisor, también, otra causa de productos de intermodulación pueden ser dispositivos pasivos como combinadores, circuladores, conectores, etc.

Los productos de intermodulación a una frecuencia f_{IM} son generados por la mezcla de dos o más señales no deseadas a las frecuencias f_1, f_2, \dots . La relación que existe entre f_{IM} y f_1, f_2, \dots , se puede expresar como:

$$f_{IM} = |u_1 f_1 + u_2 f_2 + \dots|, \quad ; u_v = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (30)$$

El orden del producto de intermodulación viene dado por $n = |u_1| + |u_2| + \dots$. Esto significa que el producto de intermodulación de segundo orden IM_2 siendo, $n = 2$ con $u_1 = 1$ y, $u_2 = 1$ viene dado por $f_{IM} = |f_1 + f_2|$ y el producto de intermodulación de tercer orden IM_3 siendo, $n = 3$ con $u_1 = 2$ y, $u_2 = 1$ viene dado por $f_{IM} = |2f_1 + f_2|$. Los productos de intermodulación $2f_1 - f_2$, $2f_2 - f_1$ y $f_1 + f_2 - f_3$ son de mayor interés para mitigar, esto debido a que se encuentran cerca del espectro de frecuencias de las señales deseadas [31].

La intermodulación se hace relevante si el receptor no es capaz de rechazar y filtrar las señales de intermodulación generadas a su alrededor, esta capacidad esta descrita en la función de rechazo del mismo receptor [29].

1.5.3 Atenuación

Se define la atenuación como la reducción de la densidad de potencia de una señal, producto de la propagación de la onda a través de un determinado medio de transmisión, donde cualquier señal que viaje de un punto A hacia el punto B sufre de una pérdida de potencia, sea el medio un espacio libre o atmosférico terrestre. La principal causa de la atenuación es la absorción molecular de los gases contenidos en la atmosfera. Debido a la atenuación la mayoría de los sistemas de telecomunicaciones requieren una etapa de amplificación [32].

Es importante mantener mínimos los niveles de atenuación en el receptor, ya que de ser muy altos podrían llevar a la señal deseada a niveles por debajo de la mínima sensibilidad de éste, lo cual impide la recepción de la señal ya que no la detectaría. Para solucionar problemas de atenuación existen etapas de amplificación en el receptor que permiten restaurar los niveles de potencia a valores deseados, lo que puede aumentar el coste monetario del sistema de telecomunicaciones, dependiendo de la complejidad del amplificador utilizado.

1.5.4 Efecto Captura

Este fenómeno se presenta en los sistemas FM y se produce cuando dos señales, poseen amplitudes cercanas y ocupan una misma portadora para transmitirse, esto causa que el receptor seleccione la señal más fuerte que será la que domine en la entrada de éste, suprimiendo la señal más débil. Los encargados de suprimir las señales más débiles son los limitadores de amplitud, estos disminuyen el efecto que puede generar cualquier señal interferente que opere en la misma frecuencia o en frecuencias cercanas al sistema afectado (Figura 8), en estos circuitos, cuando el nivel de una de las señales es mayor que la otra y también es mayor que el nivel de umbral, los picos de la señal más fuerte saturan al limitador, eliminando la señal más débil; es por esta razón, que en señales con un nivel similar, el receptor no puede diferenciar entre ellas y se conmuta entre una u otra [10].

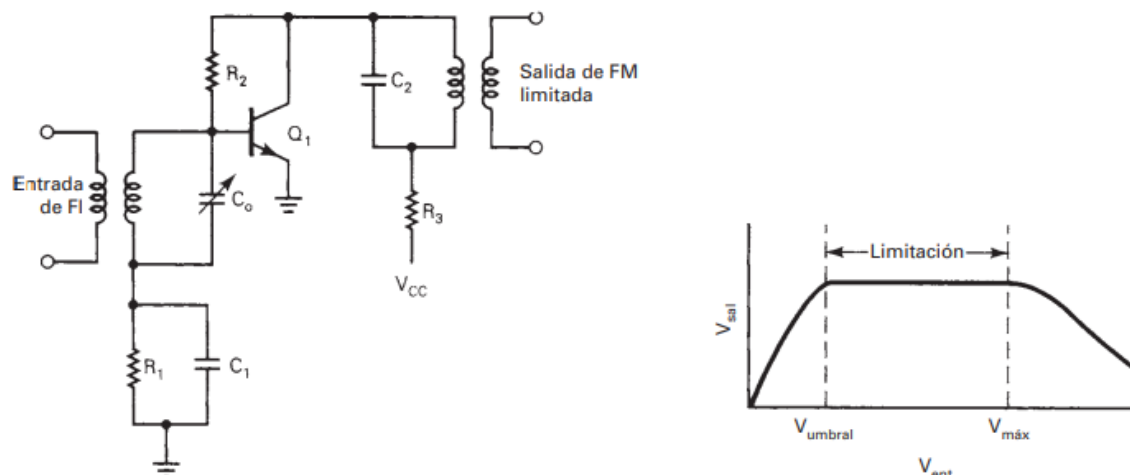


Figura 8. Izquierda: Limitador de una etapa, derecha: Acción del limitador.
Fuente: Tomado de [10]

Un ejemplo sencillo del efecto captura se puede observar en la radiodifusión sonora, cuando dos emisoras operan en la misma frecuencia y con una potencia similar a la entrada del receptor, ya que el medio por donde viajan la señales la potencia tiende a variar, por lo general, el receptor conmuta entre las dos portadoras, eligiendo la señal con más potencia de recepción en el momento, haciendo cambios repentinos de emisora. Para evitar este efecto es recomendable que la señal deseada se encuentre al menos 8 dB por encima de cualquier señal interferente [33].

El efecto captura se puede interpretar como una ventaja de la modulación angular ya que permite realizar reasignación de frecuencias o control de potencia de los transmisores que estén operando en la zonas cercanas, esto con el fin de optimizar el espacio y mejorar el uso espectral de los operadores de estas bandas [34].

1.5.5 Desvanecimiento

Es un tipo de atenuación no constante producida por pérdidas en el espacio, obstáculos presentes en medio de transmisión y la resistencia medio ambiental que afecta a la señal en el trayecto. El desvanecimiento se refleja en el receptor como baja potencia [32]. En frecuencias inferiores a los 10 GHz existen varios factores causantes de desvanecimiento como la multitrayectoria, las superficies irregulares del terreno, variaciones en las condiciones de refracción de la atmosfera, etc. [35].

Existen múltiples variables en la trayectoria física de la señal emitida, generando pérdidas de trayectoria entre el transmisor y el receptor. Estos cambios en la trayectoria están relacionados con las condiciones atmosféricas, así como la geometría de la trayectoria de la señal misma, es decir, la posición relativa de la antena con respecto al suelo y al terreno adyacente que la rodee [10].

1.6 CONCEPTOS RELEVANTES EN ANÁLISIS DE SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICOS

Existen factores de medición que es importante tener presentes en el diseño de un sistema de comunicación, ya que permiten estimar el comportamiento de éste en general, además, estos factores permiten observar la inferencia del medio en los enlaces, donde se podrían estar presentando inconvenientes, producto de factores externos al sistema o de diseño del propio.

1.6.1 Relación de Protección

Indica el valor mínimo de diferencia que debe existir entre el nivel de potencia de la señal deseada y el nivel de potencia de cualquier tipo de señal que pueda representar una interferencia potencial, expresado normalmente en dB. Esta relación es calculada con el fin de obtener una determinada calidad en la salida del receptor [36]. La relación de protección se puede interpretar como el valor en dB de una relación portadora interferencia que permita un correcto funcionamiento del sistema de telecomunicaciones.

En la Figura 9 se observa de manera gráfica que cuando una señal no deseada opera en la misma frecuencia de una deseada se debe establecer un nivel de relación de protección; sin embargo, si el Δf entre la frecuencia de operación de la señal deseada e interferente aumenta, la relación de protección requerida se puede reducir de forma gradual, considerando la separación en frecuencia, tanto como la separación espacial.

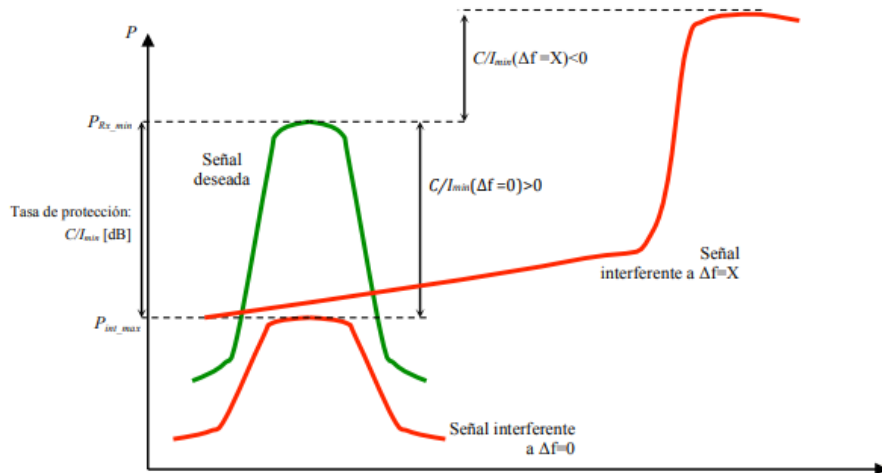


Figura 9. Representación gráfica de la relación de protección.
Fuente: ingeniería del Espectro [29].

1.6.2 Sensibilidad

La sensibilidad de un receptor indica el mínimo nivel de potencia que es capaz de detectar, de tal forma que la señal recibida conserve todas las características que le permita al receptor reconstruir la señal [37]. La ITU recomienda utilizar la relación señal-ruido-distorsión SINAD⁸ como marco de referencia para obtener el valor de sensibilidad de cualquier receptor [38].

1.6.3 Selectividad

Es el parámetro que determina la capacidad de un receptor de seleccionar la señal de transmisión deseada, y discriminar señales no deseadas de canales adyacentes [39]. En términos analíticos el factor FDR(Δf) es la representación de la selectividad en los receptores [29].

1.6.4 Ganancia

Relación expresada en dB que existe entre la potencia necesaria en la entrada de una antena de referencia sin pérdidas y la potencia suministrada a la entrada de la misma antena, para que ambas antenas produzcan en la misma dirección, la misma intensidad de campo a la misma distancia [40].

1.6.5 Relación Señal a Ruido

Se define como el cociente de la potencia de la señal deseada y la potencia del ruido en el receptor del sistema, proporcionando una medida de calidad de la señal recibida, la ecuación 31 representa esta relación [41].

$$S/N = \frac{\text{potencia de señal}}{\text{potencia de ruido}}, \quad (31)$$

S/N se expresa en dB mediante la ecuación 32.

$$(S/N)_{dB} = 10\log_{10}(S/N) \quad (32)$$

1.6.6 Relación Portadora Interferencia

Es la relación que existe entre la potencia promedio de la señal deseada y la potencia promedio de la señal interferente. Este parámetro mide la calidad de la señal frente a señales interferentes presentes en el medio de transmisión. En la ecuación 33 se plantea la expresión matemática para calcular esta relación [18].

$$C/I = P_{tD} - P_{tI} + (G_{TD} + G_{RD}) - (G_{TI} + G_{RI}) + L_{bI} - L_{bD} \quad (dBm), \quad (33)$$

⁸ Para equipos de recepción que prestan el servicio de radio móvil convencional, se tiene un valor por defecto de SINAD de 12 dB para una sensibilidad de -120 dBm [13].

donde:

P_{tD} : Potencia del transmisor deseado.

P_{tI} : Potencia del transmisor interferente.

G_{TD} : Ganancia de la antena del transmisor deseado.

G_{TI} : Ganancia de la antena del transmisor interferente.

G_{RD} : Ganancia del receptor en el enlace deseado.

G_{RI} : Ganancia del receptor en el enlace interferente.

L_{bd} : Pérdidas de propagación del enlace deseado.

L_{bi} : Pérdidas de propagación del enlace interferente.

En el caso que existan múltiples interferencias, la relación se calcula mediante la ecuación 34.

$$C/I = P_{rD} - 10 \log \left(\sum_{i=1}^n P_{rIi} \right) \text{ (dB)}, \quad (34)$$

donde:

P_{rD} : Potencia radiada deseada.

P_{rIi} : Potencias interferentes.

Determinados valores de relación portadora-interferencia son usados como relación de protección en diferentes servicios inalámbricos; éstos sirven de referencia para los sistemas de radiocomunicaciones dependiendo del tipo de servicio que se está prestando en las bandas de frecuencia de interés. En Colombia, para los servicios de radio móvil terrestre, con ancho de banda de 12,5 KHz, se recomienda valores de relación de protección de 8 dB como mínimo [29]. En caso de que un sistema de radio difusión sonora opere en la misma frecuencia de un sistema de radio móvil terrestre se debe proteger con un mínimo de 10 dB de relación de protección [42].

1.6.7 Área de Servicio

Es un segmento espacial donde conviven una serie de sistemas de telecomunicaciones representado en forma de área física, en éste se puede coordinar el uso y la gestión del espectro radioeléctrico a través de la búsqueda e implementación de nuevas formas de compartición de frecuencias y técnicas que controlen los niveles de interferencia a valores por debajo de la tolerable, esto con el fin de garantizar niveles de intensidad de campo aceptables y la coexistencia de los servicios prestados [13].

1.7 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE INTERFERENCIA

Las técnicas de análisis de interferencia existentes buscan, a través de procedimientos matemáticos, encontrar un valor de aislamiento que permita controlar los niveles de interferencia generados por otros sistemas de telecomunicaciones presentes o por señales desconocidas en el área de servicio, a continuación, se presentaran tres métodos de análisis.

1.7.1 Pérdidas de Acoplamiento Mínimo

El método de Pérdidas de Acoplamiento Mínimo (MCL, *Minimum Coupling Loss*) permite determinar la distancia máxima fija sobre la cual, la interferencia tiene un valor relevante para el sistema de telecomunicaciones afectado, a través de este método se puede encontrar el aislamiento que permite valores de interferencia que no afecten de forma relevante al sistema de comunicación de interés, algunas de sus características más importantes son [2]:

- El resultado de aislamiento está dado en dB y éste se puede convertir en una separación espacial.
- No requiere equipos de cómputo para su aplicación.
- Genera un resultado espectral poco eficiente ya que analiza el peor de los casos.
- Se asume un receptor funcionando con 3 dB adicionales a su sensibilidad de referencia.
- Los datos de la señal interferente se toman como fijos y operando en un solo canal.
- Puede ser utilizada para calcular el aislamiento necesario para evitar interferencia co-canal, de canal adyacente y la desensibilización.

La ecuación 35 permite calcular el aislamiento general.

$$\begin{aligned} \text{Aislamiento} = & P_{int} + dB_{BW} + MC_{int} + G_{vict} + G_{int} - (S_{vict} - C//I_{vict}) \\ & + f(dB_{C_{int}}, P_{int}), \end{aligned} \quad (35)$$

donde:

P_{int} :	Potencia de transmisión máxima de la interferencia.
dB_{BW} :	Factor de conversión de ancho de banda entre la interferencia y el receptor afectado.
MC_{int} :	Es el margen de múltiples portadoras para tener en cuenta cuando la fuente de interferencia es un sitio base y tiene más de una única portadora que se transmite.
G_{vict} :	Ganancia de la antena interferida.
G_{int} :	Ganancia de la antena interferente
S_{vict} :	Sensibilidad del receptor interferido.

$C//I_{vict}$: Radio de protección del afectado.
 $f(dB_{C_{int}}, P_{int})$: Valor que define la potencia del ruido del ancho de banda en el desplazamiento de frecuencia considerado en relación con la potencia de la portadora del transmisor interferente.

1.7.2 Pérdidas de Acoplamiento Mínimo Mejorado

El método Pérdidas de Acoplamiento Mínimo Mejorado (E-MCL, *Enhanced Minimum Coupling Loss*) calcula el mínimo aislamiento requerido para asegurar que un sistema de telecomunicaciones no se vea afectado por interferencia [2], su objetivo es calcular el aislamiento de forma más asertiva que su antecesor MCL. Algunas de las mejoras que se pueden encontrar dentro de este método son:

- Toma en cuenta la disponibilidad del sistema dentro del análisis de interferencia tanto el sistema interferido como en el sistema interferente.
- Se asume un receptor funcionando con una sensibilidad N dB por encima de su sensibilidad de referencia.

La ecuación 36 permite calcular el aislamiento general.

$$\begin{aligned} \text{Aislamiento} = & P_{int} + dB_{BW} + MC_{int} + G_{vict} + G_{int} - (S_{vict} - C/I_{vict}) \\ & + f(dB_{C_{int}}, P_{int}) - 10\log(10^{\frac{N}{10}} - 1), \end{aligned} \quad (36)$$

donde:

P_{int} : Potencia de transmisión máxima de la interferencia.
 dB_{BW} : Factor de conversión de ancho de banda entre la interferencia y el receptor afectado.
 MC_{int} : Es el margen de múltiples portadoras para tener en cuenta cuando la fuente de interferencia es un sitio base y tiene más de una única portadora que se transmite.
 G_{vict} : Ganancia de la antena interferida.
 G_{int} : Ganancia de la antena interferente.
 S_{vict} : Sensibilidad del receptor interferido.
 $C//I_{vict}$: Relación de protección del receptor afectado.
 $f(dB_{C_{int}}, P_{int})$: Valor que define la potencia del ruido del ancho de banda en el desplazamiento de frecuencia considerado en relación con la potencia de la portadora del transmisor interferente.
 N : Factor de aumento de sensibilidad del receptor.

1.7.3 Recomendación UIT-R SM.337-6 Separaciones en Frecuencia y en Distancia

Este estándar describe los procedimientos para calcular la separación en frecuencia y distancia necesarias entre sistemas de telecomunicaciones, esto con el fin de tener un nivel de interferencia tolerable. Teniendo en cuenta la necesidad de una correcta gestión de las frecuencias, este método establece los criterios de separación a través de análisis matemático para un correcto aislamiento entre sistemas de telecomunicaciones, para el caso especial de este análisis experimental, en donde los sistemas de telecomunicaciones utilizan una misma frecuencia portadora [3].

Esta recomendación toma en cuenta que la interferencia se analiza a través de dos factores, el espectral y el espacial.

1.7.3.1 Factor Espectral

Este factor es analizado a través de las características espectrales del posible transmisor interferente y de la respuesta en frecuencia del receptor interferido. Para lograr este cálculo es necesario saber la densidad espectral de potencia de la señal interferente y las características de respuesta en frecuencia del receptor interferido. Para el caso espectral esta característica se puede representar a través del factor de rechazo fuera del canal (OCR, Off-Channel Rejection), que matemáticamente se define en la ecuación 37 [3].

$$FDR(\Delta f) = OCR(\Delta f) = -10 \log \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) |H(f + \Delta)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) df}, \quad (37)$$

donde:

- $OCR(\Delta f)$: Factor de rechazo fuera del canal para una separación de frecuencia.
- $P(f)$: Densidad espectral de potencia de la señal interferente (W/Hz).
- $H(f)$: Respuesta en frecuencia equivalente en frecuencia intermedia del receptor interferido.
- Δf : Separación de frecuencia entre el receptor interferido y el transmisor interferente.

La ecuación 37 determina que el valor de OCR depende directamente de la separación de frecuencia que tengan la banda de paso del receptor y el espectro de la señal interferente, haciendo entender que a medida que la separación en frecuencia entre el receptor interferido y la señal interferente aumente, menor será la potencia de interferencia que afecte al receptor, es decir, se obtendrán valores más elevados de OCR.

1.7.3.2 Factor Espacial

En este factor se toma en cuenta el modelo de propagación adecuado para el entorno que rodea el sistema de telecomunicación y la distribución estadística de la señal interferente a la entrada del receptor interferido.

Teniendo en cuenta que estos dos factores buscan obtener valores de interferencia tolerables a través de la ecuación 38 [3].

$$P_d - P_i \geq \alpha, \quad (38)$$

donde:

P_d : Potencia de la señal deseada (dBW).

P_i : Potencia de la señal interferente (dBW).

α : Relación de protección (dB).

Luego, el procedimiento para encontrar la separación de frecuencia y distancia se hace a través de los siguientes pasos:

Paso 1: determinar el nivel de potencia de la señal deseada.

Paso 2: determinar el nivel de potencia de la señal deseada P_d (dBW), en la entrada del receptor interferido.

Paso 3: determinar el nivel de potencia de la señal de interferencia en la entrada del receptor interferido a través de la ecuación 39.

$$P_i = P_t + G_r - L_p - OCR(\Delta f), \quad (39)$$

donde:

P_t : Potencia isotrópica radiada equivalente del transmisor interferente (dBW).

G_r : Ganancia de la antena receptora con respecto a una antena isotrópica (dBi).

L_p : Pérdida en el trayecto de propagación.

$OCR(\Delta f)$: Factor de rechazo fuera del canal para la separación de frecuencia.

Paso 4: se analiza a través de la ecuación de relación de protección, la relación entre la potencia interferente y la potencia deseada, con el fin de encontrar una interferencia tolerable para el sistema de comunicación.

También existe un análisis alternativo, el cual permite encontrar un aislamiento requerido para mantener cualquier señal interferente controlada en un entorno real en donde el desvanecimiento es un factor importante [3].

La ecuación 40 describe el cálculo del aislamiento.

$$L = P_t + G_r - (P_{min} + \alpha) - OCR - 10 \log \left(10^{\frac{N}{10}} - 1 \right), \quad (40)$$

donde:

L : Aislamiento necesario entre el transmisor interferente y el receptor víctima para garantizar un nivel de interferencia tolerable (dB).

P_t : Potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) del transmisor interferente (dBW).

G_r : Ganancia de la antena receptora con respecto a una antena isotrópica (dBi).

P_{min} : Mínimo nivel de señal deseado (dBW).

α : Relación de protección (dB).

OCR : Factor de rechazo fuera del canal (dB).

N : Margen de desvanecimiento log-normal (dB).

1.7.4 Comportamiento Teórico de Métodos de Análisis de Interferencia

Los métodos expuestos anteriormente presentan un particular comportamiento frente al desarrollo de su análisis en comunicaciones operando a la misma frecuencia, si bien su objetivo es prevenir efectos de interferencia a través del cálculo de un aislamiento que permita distanciar, tanto en frecuencia como en distancia, sistemas de telecomunicaciones próximos en un determinado espacio terrestre, cada uno de estos métodos poseen componentes dentro de sus ecuaciones de balance del enlace, que toman valores particulares cuando el método está siendo utilizado para analizar interferencia co-canal.

En el caso de los métodos MCL y E-MCL inicialmente el factor MC_{int} es igual a cero, teniendo en cuenta una sola portadora transmitiendo desde el punto base interferente. El factor de conversión de ancho de banda dB_{BW} es igual a cero y $f(dB_{c_{int}}, P_{int})$ es igual a cero [43].

Para la recomendación ITU-R SM.337-6 se parte de que el procedimiento seleccionado debe ser el alternativo, tomando en cuenta que el análisis se debe hacer pensando en un sistema de telecomunicaciones que busca ser aislado dentro de un medio de transmisión real. a partir de lo anterior y teniendo en cuenta la recomendación se entiende que en el caso del valor de $OCR(\Delta f)$, éste toma un valor de cero [3].

De las consideraciones anteriores para aislar un receptor contra un transmisor que esté operando en la misma frecuencia, las ecuaciones de cada uno de los métodos mencionados quedarían establecidas de la siguiente manera.

Para MCL:

$$Aislamiento = P_{int} + G_{vict} + G_{int} - (S_{vict} - C//I_{vict}). \quad (41)$$

Para E-MCL:

$$Aislamiento = P_{int} + G_{vict} + G_{int} - (S_{vict} - C/I_{vict}) - 10\log(10^{\frac{N}{10}} - 1). \quad (42)$$

Para la Recomendación ITU-R SM.337-6:

$$L = P_t + G_r - (P_{min} - \alpha) - 10\log\left(10^{\frac{N}{10}} - 1\right). \quad (43)$$

Ahora teniendo en cuenta valores de $N = \{3, 10, 20\}$ dB, seleccionados para evaluar el desempeño de estos métodos de aislamientos [43], se entiende que el método MCL sólo es la representación de E-MCL cuando el valor de N es igual a 3 dB. Por lo tanto, se concluye que cuando se analiza el aislamiento requerido de sistemas operando a la misma frecuencia, los métodos MCL, E-MCL y ITU-R SM.337 operan con la misma ecuación de balance del enlace.

1.8 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Se define un SIG (Sistemas de Información Geográfica) al conjunto de componentes informáticos (Hardware y Software) y procedimientos elaborados que permiten la recolección, análisis y modelado de información referenciada a través de un punto geográfico en la tierra (coordenadas) con el fin de resolver un problema de gestión o planificación [4].

1.8.1 Tipos de Datos SIG

Un SIG puede representar elementos presentes en el mundo real, como lo pueden ser calles, fallas geográficas o edificios a través de capas temáticas (capas cartográficas), estos elementos pueden clasificarse de dos formas distintas, aquellos que son continuos (elevaciones) y aquellos que son discreto (edificios). Los SIG manejan dos tipos de información principalmente: la espacial y la temática.

1.8.1.1 Información Espacial

La información espacial hace referencia a la posición dentro de un sistema de referencia establecido, describiendo determinadas características geográficas de ésta (orográfica, vías, ríos y otros). Existen dos formas de almacenar esta información:

- **Formato ráster:** a través del cual se modela la información por medio de una unidad de información denominada celda o píxel, éstas se pueden organizar en filas y columnas, en donde cada una de estas celdas almacena un único valor de espacio geográfico trazado, un factor importante dentro del formato ráster es la resolución del modelado y está relacionado con el tamaño del píxel, entre más grande sea éste, menor es la precisión de la representación geográfica.
- **Formato vectorial:** a través del cual se modela la información por medio de puntos, líneas y polígonos, cada uno de éstos se compone de más de un par de coordenadas. Este formato es muy utilizado para representar elementos puntuales y precisos sobre el espacio.

1.8.1.2 Información Temática

La información temática está relacionada con la información espacial. Una vez obtenida la posición geográfica y la forma del objeto en el espacio, es importante que el objeto pueda proporcionar información adicional asociada a las características geográficas, es decir, información que describe al objeto espacial. Esta información se almacena dentro de una tabla que contiene los atributos necesarios, los cuales relacionan la información geográfica con la temática mediante un identificador. En la Figura 10 se observa un ejemplo gráfico de información temática bajo formato vectorial y ráster.

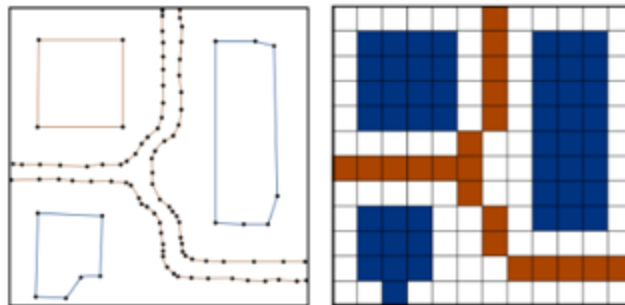


Figura 10. Formato vectorial – Formato ráster.
Fuente: Tomada de [4].

1.8.1.3 Interpolación

La interpolación es el proceso de extracción de nueva información, partiendo de información espacial ya obtenida a partir de los datos originales medidos [44].

- **Interpolación de red irregular triangulada:** el procedimiento TIN (*Triangulated Irregular Network*) intenta crear una superficie formada por triángulos de puntos vecinos más cercanos. Para hacer esto se crean circunferencias alrededor de los puntos de muestra seleccionados y sus intersecciones se conectan a una red de triángulos no traslapados y tan compactos como sea posible (Figura 11).

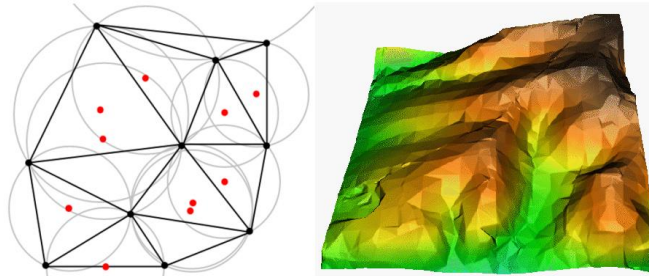


Figura 11. Procedimiento de interpolación TIN.
Fuente: tomado de [44].

2 METODOLOGÍA

La metodología que se aplica a este análisis experimental corresponde a un tipo de metodología secuencial denominada en cascada [45], es usada comúnmente en desarrollo de software, pero se puede adaptar e implementar en procesos de análisis experimental gracias al desarrollo secuencial del mismo, permitiendo desarrollar este trabajo de grado, partiendo desde los requerimientos del análisis, hasta encontrar resultados y conclusiones. En la Figura 12 se define cada sección de la metodología y como se adapta a este trabajo de grado.

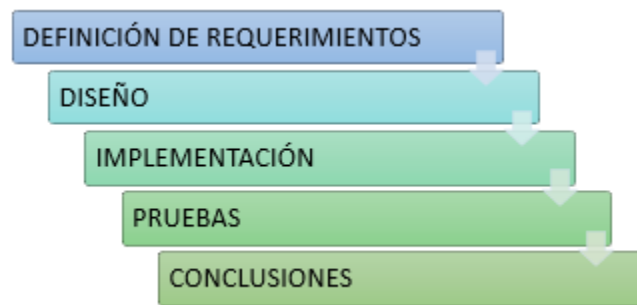


Figura 12. Esquema metodológico.

2.1 FASES DE TRABAJO

En la Figura 13 se especifican cada una de las fases a realizar en este trabajo de grado.

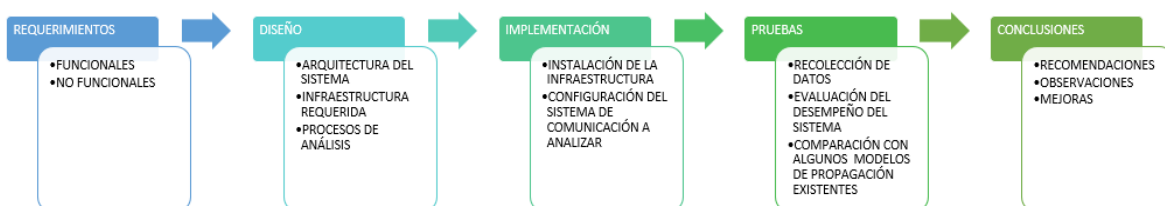


Figura 13. Fases metodológicas.

Para desarrollar correctamente este trabajo de grado es necesario estructurar un plan de acción a seguir, partiendo desde los requerimientos, los cuales se centran en cumplir los objetivos trazados, hasta obtener conclusiones al final del proceso de desarrollo investigativo. Por lo tanto, se deben establecer las directrices necesarias, con el fin de analizar de manera coherente los datos obtenidos y así encontrar resultados concluyentes.

2.2 REQUERIMIENTOS

Dentro de este trabajo de grado existen dos tipos de requerimientos necesarios para cumplir los objetivos plasmados en éste. Los requerimientos funcionales son aquellos que definen las actividades específicas que se deben desarrollar para cumplir los objetivos de este trabajo de grado, a través de un análisis experimental, y el segundo tipo de requerimientos, los no funcionales definen como se van a desarrollar y cumplir las actividades específicas. A continuación, se describen los requerimientos funcionales y no funcionales.

2.2.1 Requerimientos Funcionales

El análisis experimental debe:

- Permitir establecer la relación portadora-interferencia en VHF y UHF, para que el sistema de telecomunicaciones funcione de manera eficiente.
- Permitir la convivencia de al menos dos sistemas vecinos operando en la misma frecuencia.
- Permitir calcular la distancia de separación entre sistemas de comunicación operando a una misma frecuencia.
- Hallar el área de servicio para sistemas de comunicación que brindan servicios de radio móvil terrestre.

2.2.2 Requerimientos No Funcionales

- Hacer uso de equipos que brinden el servicio de radio móvil terrestre.
- Configurar varios emplazamientos de transmisión en los cuales se pueda tanto transmitir como recibir señales en Frecuencia Modulada (FM).
- Ubicar los sistemas de telecomunicaciones sin interferir o ser interferidos por otros sistemas de telecomunicaciones que estén operando en áreas de servicio adyacentes.
- Encontrar la relación que existe entre la frecuencia a la que opera el sistema y el comportamiento del área de servicio.
- Hacer toma de medidas en diferentes entornos geográficos.
- Comparar el desempeño de los enlaces de comunicación haciendo variación de frecuencias.

2.3 DISEÑO

En la fase de diseño se establece la infraestructura y los procesos que permiten lograr el cumplimiento de los requerimientos planteados para el análisis experimental, con el fin de encontrar los recursos necesarios y un plan de trabajo que de orden a la investigación.

2.3.1 Arquitectura

Se plantea una arquitectura basada en un sistema de comunicación de radio móvil convencional; el cual cuenta con dos dispositivos transmisores, uno de ellos es el deseado y el otro interferente, además, están acompañados de un dispositivo receptor víctima. Debido al rango de frecuencias y los servicios que se despliegan en éstas, se hace uso de modulación en frecuencia. La Figura 14 muestra la arquitectura diseñada para este trabajo de grado y los respectivos elementos que la componen.

Donde:

- Ms-FM corresponde a transmisores FM que pueden variar su frecuencia de operación y deben operar conjuntamente en la misma frecuencia separados determinada distancia.
- Bs-FM es un dispositivo que funciona como receptor de las señales transmitidas y que funciona como observador, es ubicado en una distancia variable de los dos trasmisores.
- MEDIDOR DE NIVEL DE SEÑAL: corresponde al medidor de intensidad de campo o potencia.

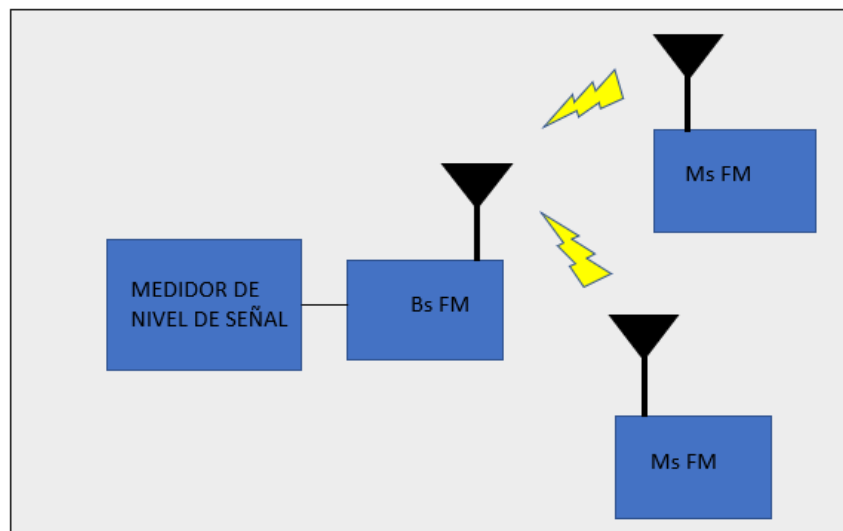


Figura 14. Arquitectura.

2.3.2 Infraestructura

La infraestructura es el conjunto de elementos que permiten realizar las diferentes actividades necesarias para el desarrollo de este trabajo de grado, una de ellas es la recolección de datos. Como se observa en la Figura 14, se hacen necesarios dispositivos de transmisión, recepción y sus complementos. A continuación, se describen los elementos de infraestructura requeridos que se plantearan como solución.

2.3.2.1 Hardware

Como requerimiento hardware se plantea los siguientes conjuntos de equipos de transmisión, recepción y medición; a fin de cumplir el esquema de arquitectura planificado para desarrollar este trabajo de grado:

- **Primera opción:** se planea como infraestructura utilizar generadores de tono analógicos, los cuales están integrados en el bloque *Ms FM* y funcionan como transmisores de larga distancia, para evaluar aislamientos reales. Para evaluar la relación de protección necesaria de forma experimental, se propone el uso de equipos de tipo SDR (Radio Definido por Software); y como dispositivo de medición de niveles de potencia, se considera un medidor analógico el cual estaría ubicado en el bloque *Bs FM*. Sin embargo, las dimensiones de los equipos generadores de tono disponibles representaban un problema de movilidad en campo abierto, en donde se esperaba realizar la recolección de datos, adicionalmente ninguno de los equipos de esta opción contaba con los niveles potencia que brindara los alcances de señal requeridos en este trabajo de grado.
- **Segunda opción:** Se plantea utilizar equipos de transmisión de elevado alcance de cobertura de marca Kenwood TM-281^a, éstos iban a ser asignados como transmisores *Ms FM* de la arquitectura; este dispositivo cuenta con niveles de potencia de aproximadamente de 65 vatios. De la misma forma que la primera opción, se plantea utilizar los mismos mecanismos para evaluar y medir la relación de protección necesaria y los valores de potencia en la recepción. Sin embargo, los equipos de transmisión requerían de un complejo nivel de asistencia logística, debido al tamaño y a su alta demanda energética; por lo tanto, se dificulta la movilidad requerida que permitiría realizar este trabajo de grado.
- **Tercera opción:** Por último, se elige una serie de equipos que satisfacen los requerimientos de movilidad, presupuesto y alcance necesarios para realizar este trabajo de grado. Para transmitir señales a corta distancia se plantean los equipos de transmisión USRP B210 (Tabla 5) y para transmitir señales a largas distancias se eligió el Transceptor *UV-5R-PLUS BAOFENG* [46] (Tabla 6); los cuales están integrados en el bloque *Ms FM* de la arquitectura planteada. Para captar y medir la señal proveniente de los dispositivos

mencionados con anterioridad, se eligió el dispositivo de recepción *SDR Dongle RTL2832UR820T2* (Tabla 7).

- **USRP B210 NI (*Universal Software Radio Peripheral*)**

Tabla 5. Características del dispositivo B210.

Ptx (dBm)	Rango Frecuencia Tx (MHz)	Programa de configuración	Longitud de antena (cm)
Max 20 dBm	88 - 6000	GNURadio	20

- **Transceptor UV-5R-PLUS BAOFENG**

Tabla 6. Características transceptor BAOFENG.

Ptx (W)	Rango de frecuencias (MHz)	Longitud de la antena (cm)	Modulación	BW (KHz)
1-4	136 – 174	10	FM	2,5
				5
				6,25
1-4	400 – 480			10
				12,5
				25

Para la toma de medidas se busca un dispositivo que permita recibir señales dentro del rango de frecuencias requerido, este dispositivo no debe contar con Control Automático de Ganancia (AGC, Automatic Gain Control), o al menos poder desactivarse, ya que el AGC otorga ganancia de forma automática al nivel de potencia recibido e imposibilita un análisis real de las señales utilizadas. En el mercado el único dispositivo que permite operar en esta configuración y, adicionalmente, se ajustaba a las condiciones presupuestarias es el dispositivo *SDR Dongle RTL2832UR820T2*, en la Tabla 7 se encuentran algunas características relevantes del dispositivo.

- **RTL2832UR820T2**

Tabla 7. Características RTL2832UR820T2.

Sensibilidad (dBm)	Rango Frecuencia Rx (MHz)	Interfaz de Monitoreo	Longitud de la antena (m)	Impedancia(Ω)	AGC
120 con SINAD 12 dB	88 – 500	SDRConsole	2	50	configurable

2.3.2.2 Software

Debido a que se utilizan dispositivos basados en SDR, éstos requieren de programas de configuración, los cuales se encargan de brindar al usuario las herramientas necesarias para establecer las características requeridas en el funcionamiento de cada uno de los dispositivos utilizados. También, se necesita un software de simulación que permita comparar los resultados obtenidos en el análisis experimental; por último, se requiere de un software que permita modelar la cobertura real obtenida a partir de los datos medidos en campo.

- **GNU Radio**

Es una herramienta libre y abierta que a través de un entorno gráfico denominado *GNU Radio Companion*, la cual permite implementar sistemas de radio definido por software por medio de bloques configurables.

La herramienta permite tomar equipos RF que funcionan bajo tecnología SDR, la cual permite, desde una sola pieza de hardware, diseñar, implementar y crear aplicaciones de tecnología inalámbrica. GNU Radio permite cargar una configuración determinada y desplegar cualquier servicio de radio definido por software; sin embargo, esta herramienta también permite implementar cualquier configuración en forma de simulación. GNU Radio puede ser utilizada mediante la creación de aplicaciones a través de lenguaje Python y la creación de librerías en C++ [47].

- **SDRConsole**

Es una interfaz de visualización y configuración que por defecto se usa con los dispositivos *RTL2832UR820T2* que permite monitorear y captar las señales presentes en el espectro a través de los datos obtenidos de un dispositivo SDR. La interfaz permite configurar desde el tipo de modulación a utilizar, hasta la activación o desactivación del AGC que posee el dispositivo que se esté usando.

A través de esta herramienta se pueden observar los niveles de potencia de recepción en determinada frecuencia deseada, además, permite al dispositivo elegir la ganancia de RF que se le puede aplicar a la señal captada y también, configurar el ancho de banda que se desea captar. Adicionalmente, se pueden medir los niveles de intensidad de campo mientras se conozca la frecuencia de la señal transmitida y esté por encima de los umbrales de sensibilidad del dispositivo [48].

- **Matlab**

Es un software pago de programación y cálculo numérico que a través de código permite analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos, como el cálculo de radio enlaces a larga distancia en regiones geográficas reales [49]. Este programa permite simular modelos de pérdidas por propagación, con estas simulaciones se realiza un análisis comparativo con los resultados obtenidos del análisis experimental.

- **QGIS**

Es uno de los más usados SIG disponible actualmente en su campo de trabajo, siendo de uso libre y licenciado por GNU, a través del cual se pueden visualizar, editar y analizar numerosos formatos de datos (vectoriales, ráster). QGIS le permite al usuario hacer uso de potentes algoritmos de cálculo y generación de mapas de estimación. En este caso, particularmente, se elige este programa debido a que permite modelar áreas de servicio obtenidas de forma experimental.

2.3.3 Diseño de Pruebas

El procedimiento que se realiza para obtener la información necesaria para cumplir los objetivos dentro del análisis experimental se divide en dos etapas (Figura 15); las cuales se apoyan de la metodología utilizada. La primera etapa tiene como objetivo encontrar una relación de protección mínima que brinde una base experimental para encontrar una separación espacial que proteja los sistemas de comunicación contra la interferencia co-canal, también, se espera observar el comportamiento real y los diferentes efectos que ocasiona el medio a la señal que se propaga de forma preliminar.

Posteriormente, en la segunda etapa del procedimiento, se busca, a través del despliegue de un sistema de radio móvil terrestre convencional, encontrar la mínima distancia de separación que debe existir entre un receptor operando dentro del área de servicio de su influencia y un transmisor interferente, esto basándose en la información obtenida de la etapa anterior. Adicionalmente, por medio de mediciones exploratorias y el uso del software SIG, establecer áreas de servicio experimentales. Por último, todos los valores obtenidos son sometidos a un análisis comparativo con modelos empíricos existentes.

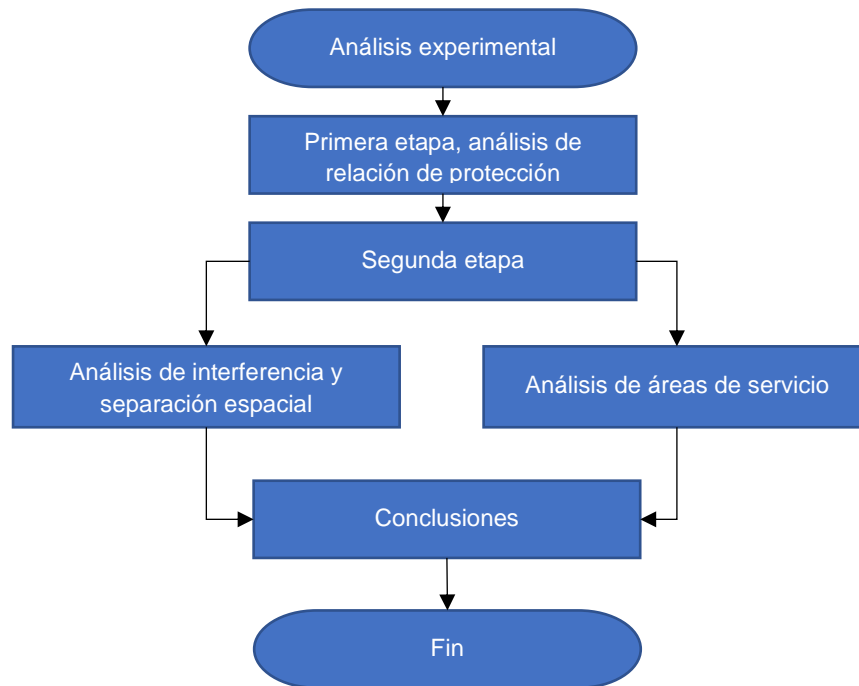


Figura 15. Planteamiento del diseño de pruebas.

2.3.3.1 Primera Etapa, Análisis Experimental de la Relación de Protección

Mediante el despliegue de un sistema de comunicación inalámbrico se planifica la toma de datos, la cual permite encontrar la relación de protección mínima requerida para que dos sistemas operen a la misma frecuencia, este procedimiento se lleva a cabo en un medio de transmisión sin obstáculos, es decir, Línea de Vista (LOS, *Line Of Sight*) esto con el fin de observar, en un entorno con el mínimo de factores ambientales externos, el comportamiento de la señal deseada e interferente, estas señales permitan calcular un valor de relación portadora-interferencia para que el receptor víctima pueda operar de forma correcta, sin riesgos de un posible efecto de interferencia co-canal.

UNIDAD DE MEDICIÓN PRELIMINAR

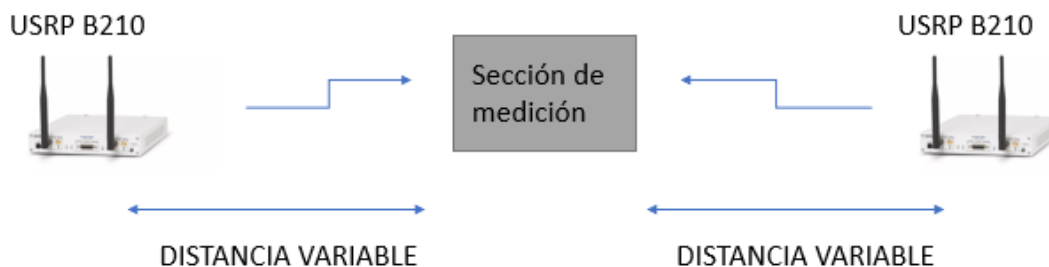


Figura 16. Arquitectura escenario preliminar.

En la Figura 16 se muestra el esquema planteado para analizar de manera preliminar, la relación portadora interferencia, a partir de la cual se obtiene la relación de protección necesaria dentro de un sistema de radio móvil terrestre. Por medio del diagrama de la Figura 17 se muestran las directrices para la realización de toma de datos en un área reducida, este diagrama de flujo se propone con el fin de estructurar el procedimiento con el cual se hace el análisis de interferencia y mínima separación espacial entre transmisores operando en una misma frecuencia.

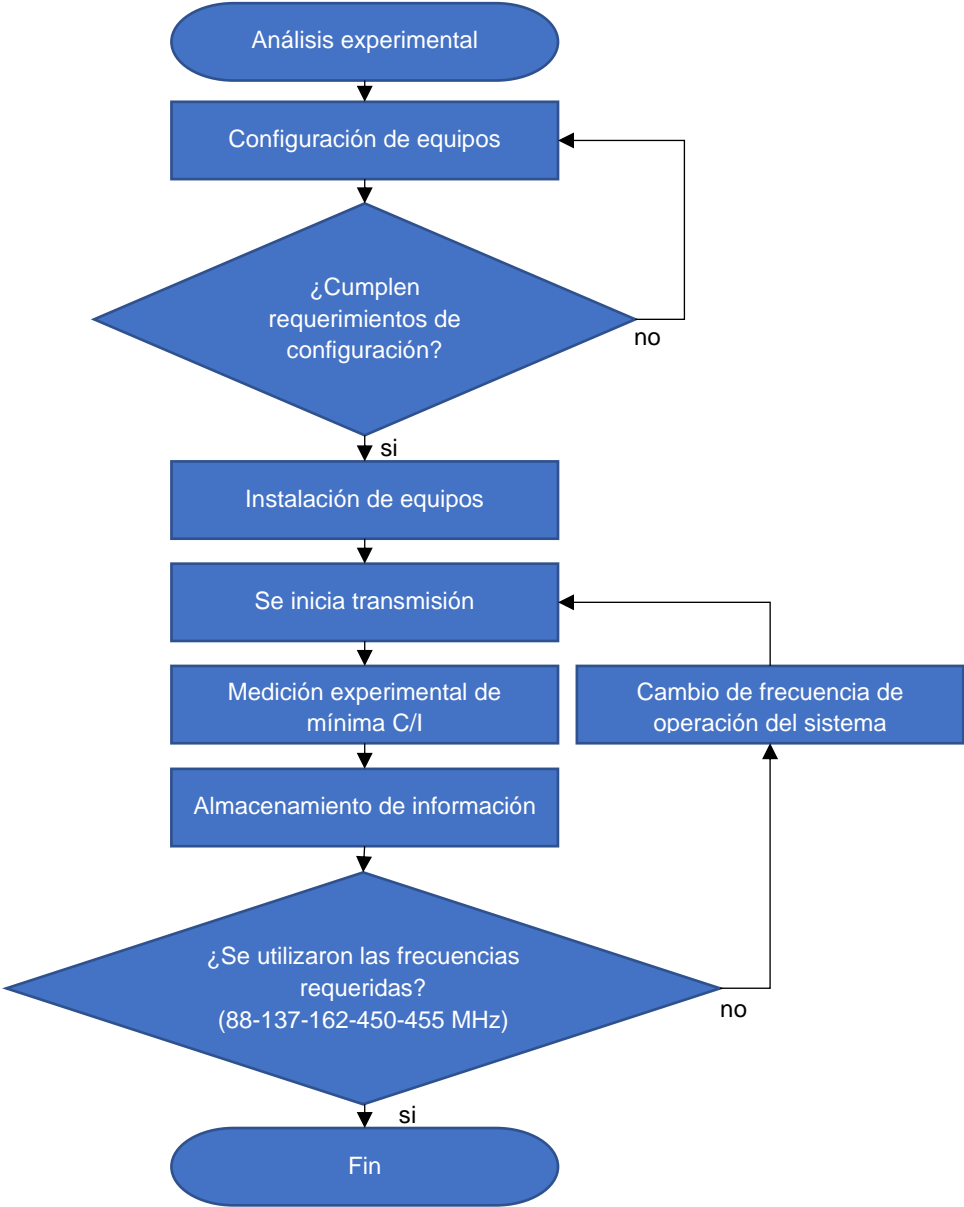


Figura 17. Esquema de pruebas primera etapa.

Los equipos de transmisión y recepción deben cumplir unos requerimientos de trabajo necesarios para poder iniciar las pruebas, ya que los rangos de frecuencia VHF y UHF abarcan una cantidad significativa de frecuencias, en las cuales se

puede realizar el respectivo análisis. Se acuerda evaluar determinados valores puntuales de frecuencia, éstos son: 88 MHz, 137 MHz, 162 MHz, 450 MHz y 455 MHz. La razón por la cual se eligen estos valores es la limitación en banda de los dispositivos utilizados en la segunda etapa, por lo tanto, se unifican todos los valores seleccionados; adicionalmente el ancho de banda de operación se establece en 12,5 KHz. El equipo de transmisión y recepción debe estar emplazado a una altura mínima de 1.5 metros sobre el terreno en el que se encuentran [50].

2.3.3.2 Segunda Etapa Análisis Experimental de Interferencia y Áreas de Servicio

Una vez encontrada la relación portadora interferencia mínima, se busca de forma experimental, a través de las medidas de potencia en un medio de transmisión cuya trayectoria entre transmisor y receptor supere los 500 metros, las distancias que permitan dar un aislamiento de interferencia co-canal y las áreas de servicio más cercanas a la realidad. Con el fin de lograr este objetivo se hace necesario el despliegue de un sistema de telecomunicaciones basado en modulación en frecuencia FM convencional, como el mostrado en la Figura 18, el cual brinda el servicio de radio móvil terrestre convencional, este sistema se define como el escenario principal de pruebas, el cual va a estar subdividido en zonas de transmisión, las cuales desempeñan el papel de múltiples tipos de medios de propagación.



Figura 18. Esquema del escenario real planificado.

Los equipos de transmisión y recepción deben cumplir unos requerimientos de trabajo necesarios de operación del sistema de telecomunicaciones. El primero es poder operar haciendo uso de las frecuencias VHF y UHF, para esto se elige modular y demodular en FM con las siguientes frecuencias centrales: 137 MHz, 162 MHz, 450 MHz y 455 MHz; debido a que los dispositivos seleccionados para transmitir a largas distancias operan en rangos de frecuencia limitados al servicio de radio móvil convencional; adicionalmente su ancho de banda de operación debe ser 12,5 KHz, por último, el alcance de éstos debe operar como mínimo con 500 metros de alcance.

El diagrama de flujo de la Figura 19 que explica el proceso toma de medidas y análisis experimental.

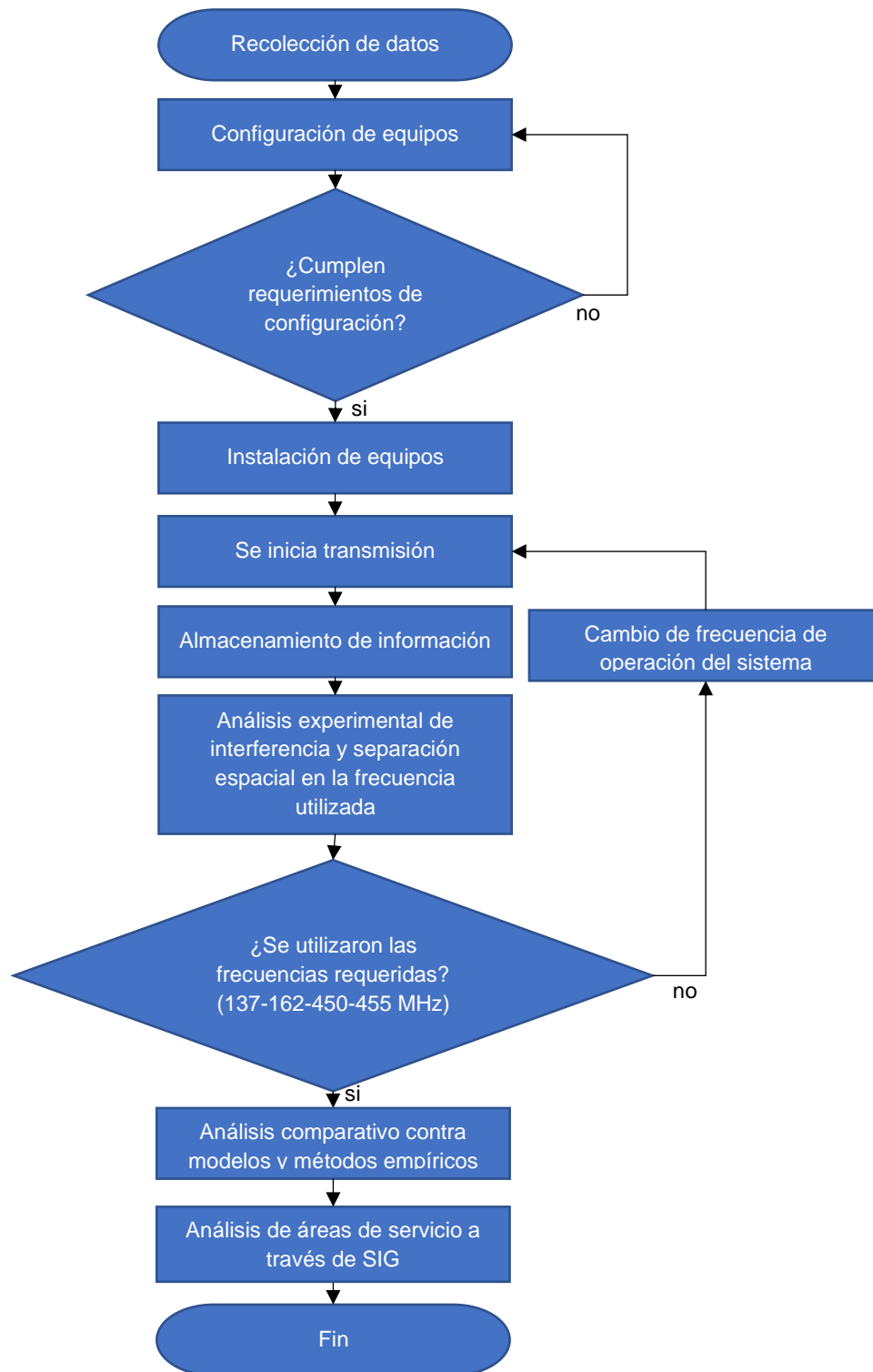


Figura 19. Esquema de pruebas, segunda etapa.

- **Diseño Experimental de Análisis de Áreas de Servicio**

En la elaboración experimental de mapas de áreas de servicio se propone inicialmente el despliegue de un sistema de telecomunicaciones de radio móvil convencional, el cual a través de un medidor de potencia permita medir los niveles de señal que llegan a distintos puntos de la ciudad en diferentes frecuencias VHF y UHF. En la Figura 20 se observa el modo de funcionamiento del proceso de recolección de información.

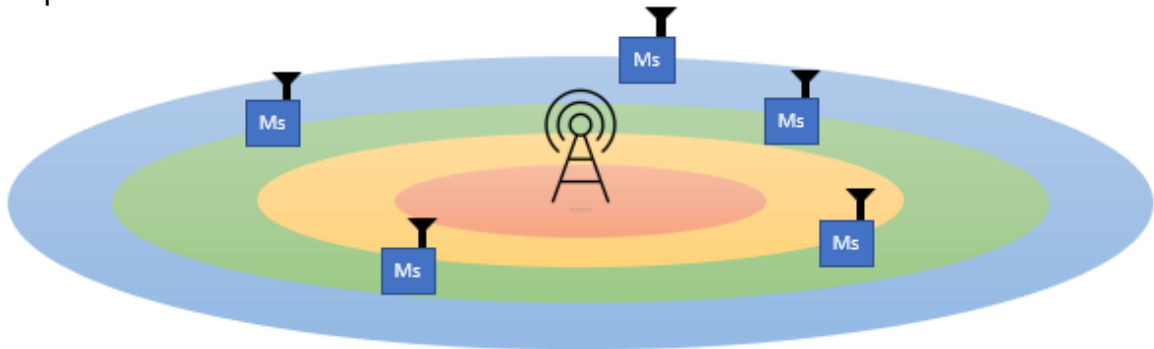


Figura 20. Elaboración experimental de un mapa de área de servicio.

En la Figura 21 se muestra el esquema estructural a seguir para la realización de áreas de servicio y análisis de cobertura de forma experimental a través de uso de herramientas SIG.

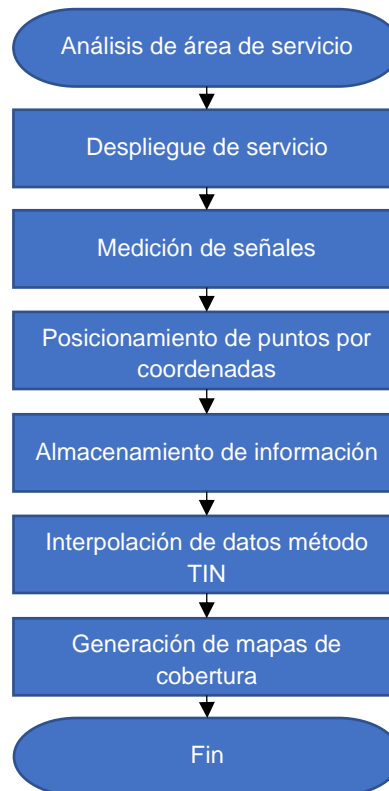


Figura 21. Procedimiento análisis experimental de áreas de servicio.

2.3.3.3 Plan de Pruebas

Con el fin de cumplir los objetivos planteados en el trabajo de grado se requiere establecer un plan de pruebas, en el cual deben estar plasmadas las principales condiciones que dan veracidad a las medidas y valores obtenidos a lo largo de todo el proceso experimental, tanto de la primera etapa como de la segunda etapa. Esto con el objetivo de que las distancias obtenidas de mínima separación espacial entre sistemas de telecomunicaciones operando a la misma frecuencia y mapas de área de servicio; tengan en cuenta la mayor cantidad de factores naturales y artificiales posibles, como lo son obstáculos y entornos de propagación.

- **Casos de Prueba**

Los entornos geográficos y las condiciones de transmisión trazan los casos de prueba. El valle de Pubenza brinda características orográficas diversas como zonas urbanizadas, montañosas y llanas, las cuales permiten evaluar diferentes enlaces que se pueden establecer con LOS y NLoS.

- El primer caso busca identificar de forma experimental el mínimo valor portadora interferencia, que permita una comunicación estable.
- El segundo caso se realiza garantizando mediciones y estudio del comportamiento de un sistema de radio móvil terrestre en un entorno de propagación boscoso y geográficamente montañoso.
- El tercer caso se formula estableciendo un enlace de radio móvil terrestre en un entorno de propagación suburbano.
- El cuarto caso se despliega en un entorno de propagación urbano con edificaciones de tamaño medio-bajo.

2.3.3.4 Comparación de Resultados Obtenidos Contra Modelos de Propagación y Valores Teóricos

Una vez obtenidos los valores de potencia y atenuación en los sistemas de telecomunicaciones usados en la investigación, deben ser comparados con los valores calculados en modelos de propagación empíricos. La principal razón de este requerimiento es comprobar comportamiento de los sistemas de telecomunicaciones en la geografía local. La segunda razón es evaluar si es necesario un estudio más a fondo del comportamiento espectral en la región y a nivel general en Colombia, ya que la mayoría de las especificaciones técnicas usadas para el despliegue de sistemas de telecomunicaciones en el país están basadas en estándares o modelos de propagación empíricos, cuyas mediciones se han realizado en otros estados, con este análisis comparativo se busca puntualmente encontrar el método de análisis de interferencia y el modelo de propagación que mejor representa el comportamiento de los sistemas de telecomunicaciones en el área local de Popayán.

Se elijen los siguientes modelos de propagación para comparar los valores obtenidos:

- Modelo de propagación en Espacio Libre.
- Modelo de propagación Okumura-Hata.
- Modelo de propagación de Pendiente Única.
- Modelo de propagación Egli.
- Modelo de propagación de Dos Rayos.

3 INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN

Esta sección describe el proceso de instalación y configuración de los equipos hardware, que permitirán la obtención de datos para el análisis experimental. También, se describe la información de ubicación geográfica de los transmisores y de la zona de evaluación de área de servicio planificada para cumplir los objetivos de la investigación.

3.1 *RTL2832UR820T2* Y SU FUNCIÓN COMO RECEPTOR

En el procedimiento de toma de datos y almacenamiento de información, se plantea utilizar el *RTL2832UR820T2* (Figura 22) como receptor durante todo el proceso investigativo de este trabajo de grado, teniendo en cuenta sus capacidades de recepción, la facilidad de instalación, su configurabilidad desde interfaz y a la capacidad logística de movilidad que posee.



Figura 22. Dispositivo de recepción RTL2832U.

Una de las ventajas más grandes del *RTL2832UR820T2* es la capacidad de ser configurado desde una interfaz software, a través de ésta se programa el tipo de modulación a recibir, el manejo de control automático de ganancia y el ancho de banda que se desea recibir, en la Figura 23 se observa la plataforma de configuración del *RTL2832UR820T2*.

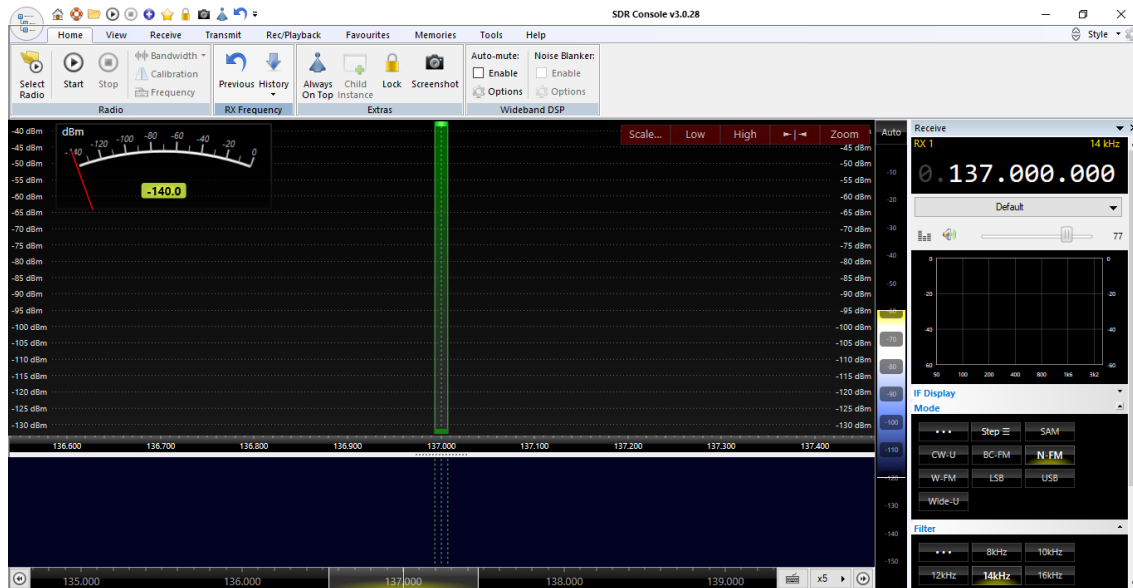


Figura 23. Interfaz del analizador de espectro SDRConsole.

La mayoría de los dispositivos de recepción actualmente poseen un circuito o sección que controla automáticamente la ganancia de la señal que reciben, adaptándola a su conveniencia con el objetivo de aumentar su nivel de potencia en la entrada del demodulador. Para dar una correcta evaluación de datos es necesario anular el AGC, en este caso el dispositivo de recepción *RTL2832UR820T2* utilizado para las pruebas permite apagar el AGC y adaptar una ganancia RF estática la cual permite evaluar los verdaderos valores de potencia a la entrada del receptor, como se observar en la Figura 24.

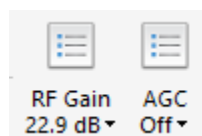


Figura 24. Desactivación de AGC y ganancia de RF estática.

3.2 TRANSMISOR FM PARA PRUEBAS DE LA PRIMERA ETAPA

Para poder iniciar las pruebas acordadas de la primera etapa es necesario configurar el dispositivo USRP B210 como un transmisor FM que pueda operar en rangos de frecuencia seleccionados y adicionalmente utilice el ancho de banda requerido de 12,5 KHz. Inicialmente se deben instalar los *drivers* requeridos para que haya comunicación entre el USRP B210 y el ordenador en el que va a ser conectado, para ello se utiliza el software *Zadig* que descarga automáticamente los programas requeridos al ordenador. En la Figura 25 se observa la interfaz del software *Zadig*.

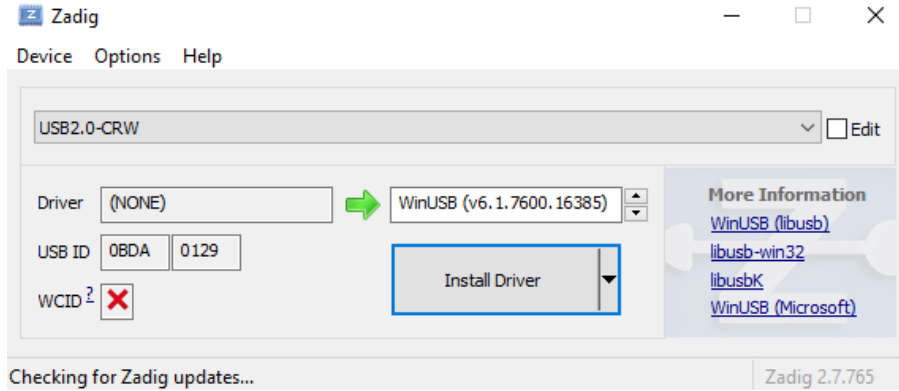


Figura 25. Interfaz software Zadig.

Posteriormente, se configura el equipo a través de GNU Radio como transmisor FM a un ancho de banda de 12,5 KHz simulando ser una estación de radio móvil convencional, para ello se hace uso del esquema de bloques de configuración de los equipos B210. En la Figura 26 se muestra de forma general el esquema de bloques utilizado, el cual es conformado por, *Wav File Source*, *Low Pass Filter*, *FM Preemphasis*, *NBFM Transmit*, *Rational Resampler* y *UHD: USRP Sink*, donde cada sección de bloque cumple una determinada función.

A continuación, se describe brevemente el funcionamiento de cada uno de los bloques usados en este esquema.

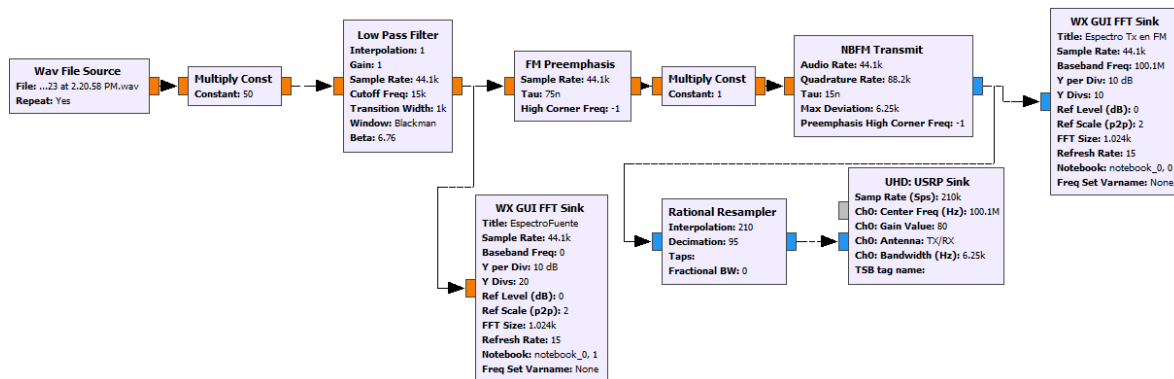


Figura 26. Esquema de bloques en GNURadio para el transmisor FM.

Para poder transmitir audio se requiere un bloque que permita extraer archivos de audio del ordenador, en la Figura 27 se observa el bloque *Wav File Source*, el cual permite importar a la herramienta de GNU Radio notas de audio legibles para transmitir, este bloque extrae solo archivos que estén guardados bajo el formato Wav.

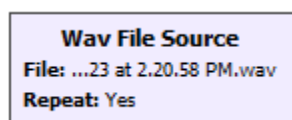


Figura 27. Bloque WAV file source.

Lo siguiente es implementar un filtro que permita el paso de un rango determinado de frecuencias del audio del bloque anterior, porque los servicios de radio móvil terrestre solo es necesario transmitir voz audible, para este caso la frecuencia de corte del bloque de la Figura 28 se establece en 15 KHz.

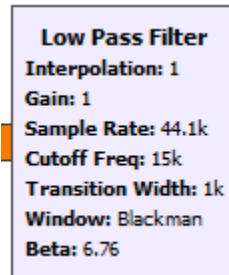


Figura 28. Bloque de filtro pasa bajo.

Se requiere un filtro de preénfasis FM que permite mejorar la relación señal a ruido y por tanto la calidad de la señal que capta el receptor al momento de iniciar el proceso de detección [51], el cual se muestra en la Figura 29.

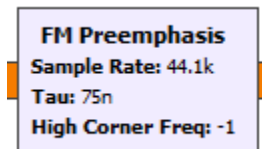


Figura 29. Bloque de filtro de preénfasis FM.

El bloque de la Figura 30 se encarga de modular la señal a transmitir, ya que el servicio que se busca evaluar es radio móvil terrestre se usa un bloque que opere con modulación en frecuencia de tipo NBFM (*Narrow Band Frequency Modulation*), y se configura con una desviación máxima de 6,25 KHz.

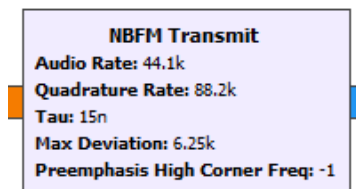


Figura 30. Bloque de modulación NBFM.

Ya que el proceso computacional es bastante rápido, se requiere una etapa que retarde un poco la señal y sea entendible para su escucha luego de su demodulación. El bloque de retardo se observa en la Figura 31.



Figura 31. Bloque de retardo.

Por último, se adapta el bloque de la Figura 32 que configura y transmite la señal modulada por el dispositivo hardware, este bloque permite configurar la frecuencia central a la cual transmite el dispositivo B210, la ganancia de transmisión y el ancho de banda de operación.



Figura 32. Bloque de comunicación con dispositivo USRP.

En la Figura 33 se muestra el equipo B210 configurado y conectado a equipo computacional.



Figura 33. Equipo de transmisión configurado para la primera etapa.

3.2.1 Funcionamiento de la USRP B210

En la Figura 34 se observa que la herramienta GNU Radio permite generar señales en frecuencias VHF y UHF, las cuales son de interés en este trabajo de grado, con esto se permite determinar que la señal que se desea transmitir está dentro del ancho de banda deseado y en la frecuencia programada para ser transmitida, este proceso se hace necesario para iniciar las pruebas de la etapa 1, en donde se va a evaluar en recepción la señal transmitida por el B210 y los efectos de interferencia que puede sufrir el receptor en el momento de captar la señal.

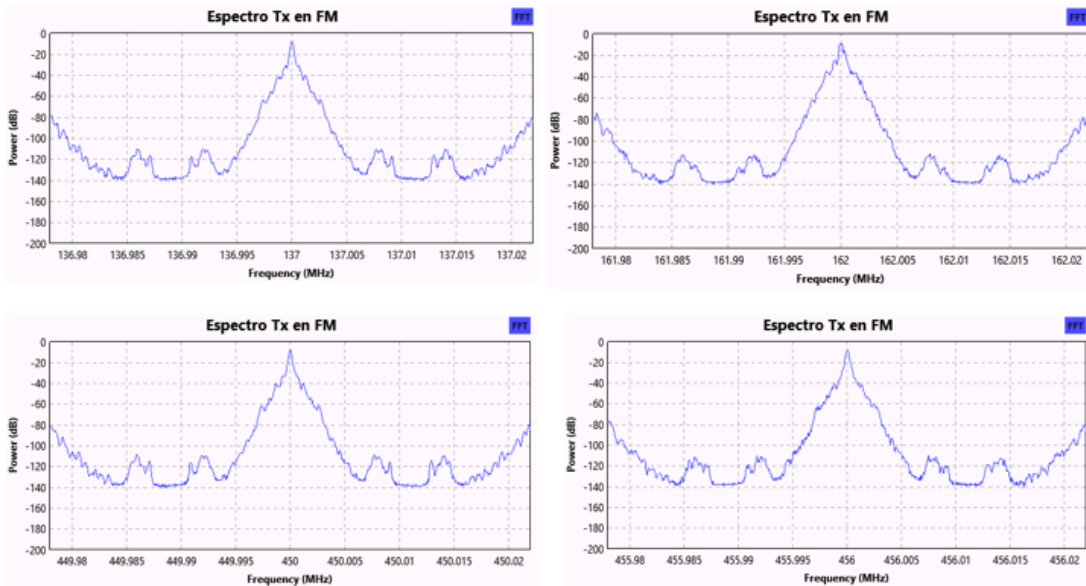


Figura 34. Resultado de la transmisión desde el equipo B210.

Una vez que se ha configurado el equipo se mide el nivel de potencia de transmisión del dispositivo B210 a la salida, para todas las frecuencias de análisis, el cual tiene un valor aproximado de -13,53 dBm, como se observar en la Figura 35.

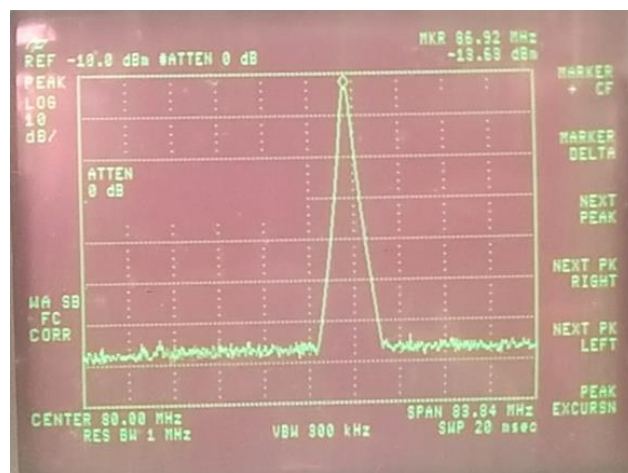


Figura 35. Características de dispositivo B210 a la salida.

3.2.2 Cálculo de la Zona Lejana

La zona o campo lejano es la distancia a partir de la cual el campo electromagnético emitido por un transmisor continúa irradiándose a lo largo del medio de transmisión [52]. La ecuación 44 define las condiciones para encontrar el campo lejano.

$$d_f > \frac{2 D^2}{\lambda}, \quad (44)$$

donde:

d_f : Distancia de campo lejano.

D : Diámetro de la antena.

λ : Longitud de onda.

La ecuación 44 viene anclada a las condiciones 45 y 46.

$$d_f \gg D, \quad (45)$$

donde la zona lejana debe ser mucho mayor que la longitud de la antena.

$$d_f \gg \lambda. \quad (46)$$

Por lo tanto, con una dimensión de la antena de 20 cm y según la frecuencia de transmisión utilizada se hace el cálculo de zona lejana, datos que muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Zonas lejanas para escenario preliminar.

Frecuencia (MHz)	Longitud de onda (m)	Zona lejana (m)	Ubicación inicial de transmisores (m)
88	3,41	3,41	10
137	2,20	2,20	7
162	1,86	1,86	6
450	0,67	0,67	3
456	0,66	0,66	3

3.3 TRANSMISOR PARA PRUEBAS DE LA SEGUNDA ETAPA

Se procede a desplegar los equipos que tienen la capacidad de transmitir a más de 500 metros de distancia, en distintos puntos seleccionados, los cuales representaran diferentes tipos de ambientes que puede enfrentar cualquier servicio de radio móvil terrestre, operando en las bandas de interés, VHF y UHF. El escenario de pruebas corresponde a la ciudad de Popayán, la cual se encuentra a una altitud de 1738 msnm (metros sobre el nivel del mar) y una temperatura media de 19° C [53].

Los valores de potencia de salida de todos los transmisores son fijos, con el fin de normalizar el análisis y que éste pueda ser usado como marco de referencia para próximos análisis experimentales, ya sea en otros rangos de frecuencias u otros servicios de telecomunicaciones inalámbricos. En la Figura 36 se muestra el esquema de despliegue del sistema de telecomunicaciones que brinda la información necesaria para el análisis.

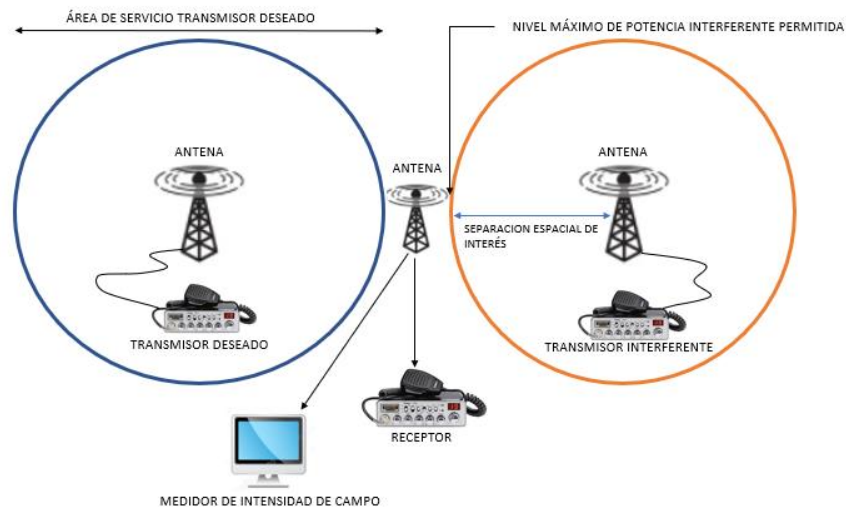


Figura 36. Esquema de despliegue del escenario real.

Se escogen diferentes puntos en la ciudad los cuales rodean periféricamente un punto central el cual servirá de monitoreo y recolección de información, estos puntos están emplazados entre los 1.100 m, y los 1.500 m, en línea de vista, que es el rango de alcance medio que puede brindar un equipo de radio con potencia de transmisión de 4 W. En la Figura 37 se muestran los puntos elegidos para realizar la recolección de datos del análisis experimental.

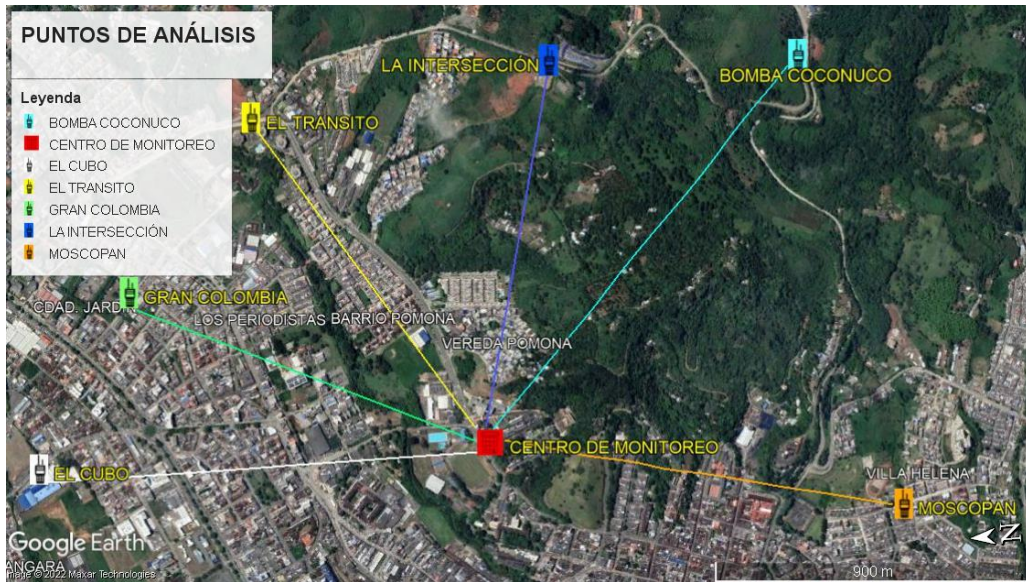


Figura 37. Puntos de transmisión.

Para el receptor de monitoreo se utiliza una antena (Figura 38), con una altura de 1,5 metros de alto ubicada sobre la cima de un edificio que tiene una altura de 25 metros, perteneciente a la Universidad del Cauca, ubicado exactamente en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Esto con el objetivo de dar el mayor alcance a la señal transmitida desde los puntos elegidos previamente.



Figura 38. Antena de recepción.

Los equipos de transmisión (Figura 39) están ubicados a una altura aproximada de 2 m, sobre la base de la tierra.



Figura 39. Radio transmisor.

En la Tabla 9 se muestran las características del centro de monitoreo.

Tabla 9. Centro de monitoreo Bs.

Altura de Popayán (MSNM)	Altura del edificio(m).	Altura de la antena. (m)	Altura total de recepción. (m)
1.738	25	2	1.765

En la Figura 40 se observa la zona de influencia del análisis experimental de interferencia y separación espacial.



Figura 40. Zonas de influencia del análisis experimental.

3.3.1 Trayectoria de Análisis 1: Bomba Coconuco

En la Figura 41 se observa la trayectoria del análisis 1, la cual corresponde a una zona boscosa de carácter montañoso. En la Tabla 10 se muestran las características de este radio enlace.

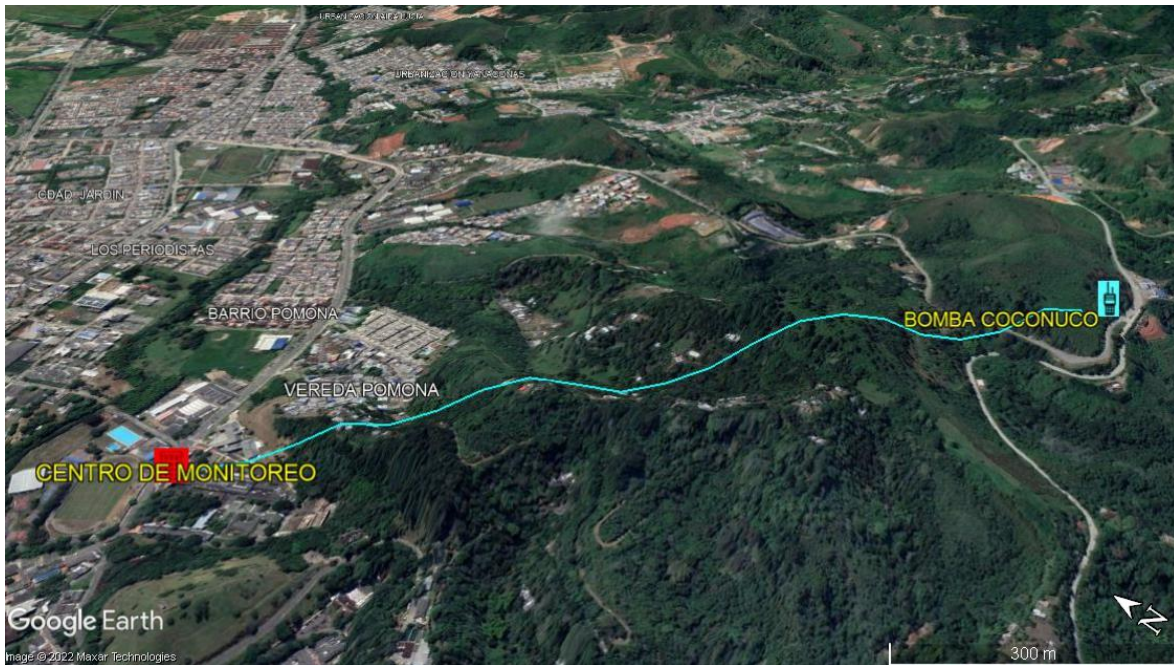


Figura 41. Trayectoria de análisis 1: Bomba Coconuco.

Tabla 10. Características estación Ms 1.

Altura de Ms. (m)	Potencia de Tx. (W)	Distancia de separación entre Ms y Bs. (Km)	Frecuencias de Tx (MHz)
1.833	4	1,42	137 – 162 – 450 – 456

3.3.2 Trayectoria de Análisis 2: La Intersección

En la Figura 42, se observa la trayectoria de análisis 2, este radio enlace se implementa en un espacio semirrural en donde alrededor de 35% de la trayectoria que cubre el medio está rodeada por una zona residencial. Las principales características de este radio enlace se observan en la Tabla 11.

Tabla 11. Características estación Ms 2.

Altura de Ms. (m)	Potencia de Tx. (W)	Distancia de separación entre Ms y Bs. (Km)	Frecuencias de Tx (MHz)
1.797	4	1,1	137 – 162 – 450 – 456



Figura 42. Trayectoria de análisis 2: La Intersección.

3.3.3 Trayectoria de Análisis 3: El Tránsito

Para la trayectoria de análisis 3 (Figura 43) se tienen las características contenidas en la Tabla 12; en este radio enlace las construcciones no superan los 15 metros de altura.

Tabla 12. Características de estación Ms 3.

Altura de Ms. (m)	Potencia de Tx. (W)	Distancia de separación entre Ms y Bs. (Km)	Frecuencias de Tx (MHz)
1.747	4	1,15	137 – 162 – 450 – 456



Figura 43. Trayectoria de análisis 3: El Tránsito.

3.3.4 Trayectoria de Análisis 4: Gran Colombia

En la trayectoria de análisis 4 (Figura 44) la zona sigue siendo urbana con un elevado aumento de la cantidad de edificios y su altura promedio llegando a los 20 m, aproximadamente. En la Tabla 13 se encuentran las características más relevantes del radio enlace.

Tabla 13. Características de estación Ms 4.

Altura de Ms. (m)	Potencia de Tx. (W)	Distancia de separación entre Ms y Bs. (Km)	Frecuencias de Tx (MHz)
1.747	4	1,11	137 – 162 – 450 – 456

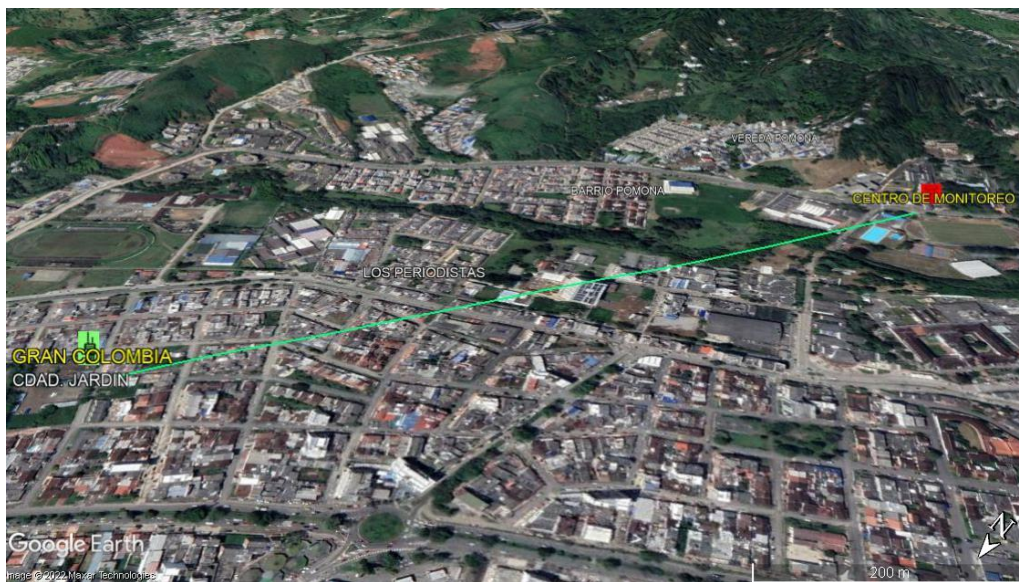


Figura 44. Trayectoria de análisis 4: Gran Colombia.

3.3.5 Trayectoria de Análisis 5: El Cubo

Para este caso el radio enlace (Figura 45) abarca desde el oriente hasta el occidente de la ciudad, teniendo una urbanización elevada; sin embargo, no existe variación notable en la orografía del trayecto. La Tabla 14 muestra las características principales del radio enlace.



Figura 45. Trayectoria de análisis 5: El Cubo.

Tabla 14. Características de Ms 5.

Altura de Ms. (m)	Potencia de Tx. (W)	Distancia de separación entre Ms y Bs. (Km)	Frecuencias de Tx (MHz)
1.742	4 W	1,3	137 – 162 – 450 – 456

3.3.6 Trayectoria de Análisis 6: Moscopan

Se observa que esta trayectoria de análisis (Figura 46) está obstruida por una serie de elevaciones geográficas. La Tabla 15 muestra las características del radio enlace.

Tabla 15. Características de Ms 6.

Altura de Ms. (m)	Potencia de Tx. (W)	Distancia de separación entre Ms y Bs. (Km)	Frecuencias de Tx (MHz)
1.742	4	1,2	137 – 162 – 450 – 456

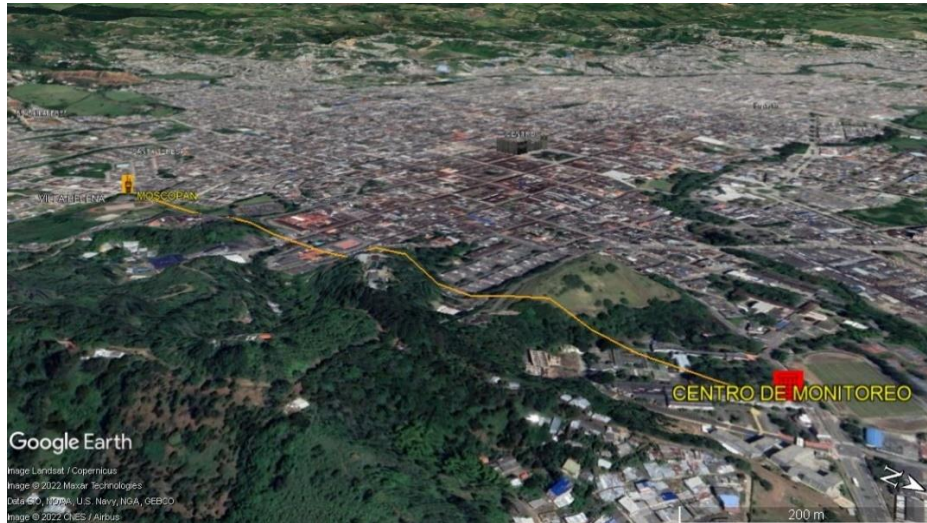


Figura 46. Trayectoria de análisis 6: Moscopan.

3.3.7 Puntos Estratégicos Para el Análisis Experimental de las Áreas de Servicio

Se seleccionan los puntos de muestreo y se realizan medidas, estos puntos permiten a través del software QGIS la interpolación necesaria para elaborar el mapa de área de servicio más aproximado a partir de la información disponible, en la Figura 47 se muestran, los puntos seleccionados donde se realiza la toma de datos de potencia de recepción, los cuales están representados como 32 estrellas rojas y la estrella amarilla es el lugar de donde se realiza la transmisión.



Figura 47. Puntos de muestreo de potencia seleccionados.

Las características del sistema se describen en la Tabla 16.

Tabla 16. Parámetros para la evaluación experimental de área de servicio.

Altura de Bs. (m)	Potencia de Tx. (W)	Altura de Ms (m)	Frecuencias de Tx
27	4	2	137 – 162 – 450 – 456 MHz

Una vez obtenidos los valores de potencia, se procede a almacenar la información en una base de datos, la cual es interpolada en QGIS para obtener una capa ráster que muestre el comportamiento aproximado de la señal transmitida.

4 RESULTADOS

Esta sección recopila los datos obtenidos con base en los procesos establecidos en el capítulo anterior, esto con el fin de obtener información del comportamiento, en las frecuencias seleccionadas, del sistema de telecomunicaciones desplegado como: la potencia de transmisión, las pérdidas de propagación, las separaciones espaciales y las áreas de servicio.

4.1 PRUEBAS DE LA PRIMERA ETAPA.

Con el fin de obtener la mínima relación portadora-interferencia que permita la convivencia de varios sistemas de telecomunicaciones que trabajan a la misma frecuencia de operación, se implementa la arquitectura propuesta, utilizando los dispositivos y las técnicas definidas, posteriormente se configura los transmisores para que su ancho de banda sea 12,5 KHz, el cual es el mismo para todas las frecuencias de operación. Finalizada la implementación del sistema de telecomunicaciones se procede a emitir señales y a analizar el comportamiento del sistema en todas las frecuencias.

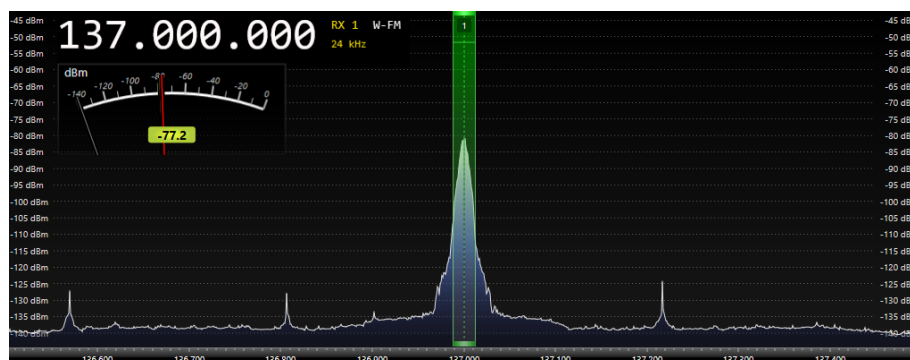


Figura 48. Visualización de la señal recibida en 137 MHz.

En la Figura 48 se muestra que el dispositivo de recepción capta la señal proveniente de los equipos B210 intencionalmente activados de forma simultánea. Uno de los efectos observables inmediatamente se inicia la recolección de datos, es el efecto captura, esto se visualiza debido a que el receptor solo capta la señal más fuerte en determinado instante de tiempo. Otro comportamiento que presenta el sistema de comunicación inmediatamente se empieza a transmitir señales, es la variación en los valores de potencia transmitida leída por el receptor, esto debido a que, en cualquier medio real, cualquier elemento presente alrededor del sistema de telecomunicaciones puede alterar la señal detectada por el receptor debido a la multitrayectoria. En la Tabla 17 se observan los valores obtenidos de la recolección de información, cuando los transmisores deseado e interferente se encuentran a la misma distancia del receptor.

Se debe tener en cuenta que los resultados de relación portadora-interferencia de la Tabla 17 se encuentran en valor absoluto, esto debido que al estar ubicados a la misma distancia los transmisores deseados e interferente, algunos niveles de potencia de la señal interferente medidos fueron superiores a los niveles deseados; generando relaciones portadora-interferencia negativas.

Tabla 17. Valores de nivel de potencia obtenidos de transmisión inicial.

Frecuencia (MHz)	Relación portadora-interferencia (dB)	Potencia Rx deseada (dBm)	Distancia separación Tx deseado (m)	Potencia Rx interferente (dBm)	Distancia separación Tx interferente (m)
88	1,7-2,7	-75,8	10	-74	10
137	1,9-2,4	-73,5	7	-75,4	7
162	1,2-1,5	-68,6	6	-67,2	6
450	2,1-2,4	-65,5	3	-63,4	3
456	1,7-2	-62,7	3	-64,5	3

Inicialmente a la salida del dispositivo B210 se mide el valor de potencia de transmisión obteniendo un valor aproximado de -13,6 dBm; en la Figura 49 se muestra de manera grafica el comportamiento de las señales transmitidas por el dispositivo B210 a través del espacio.

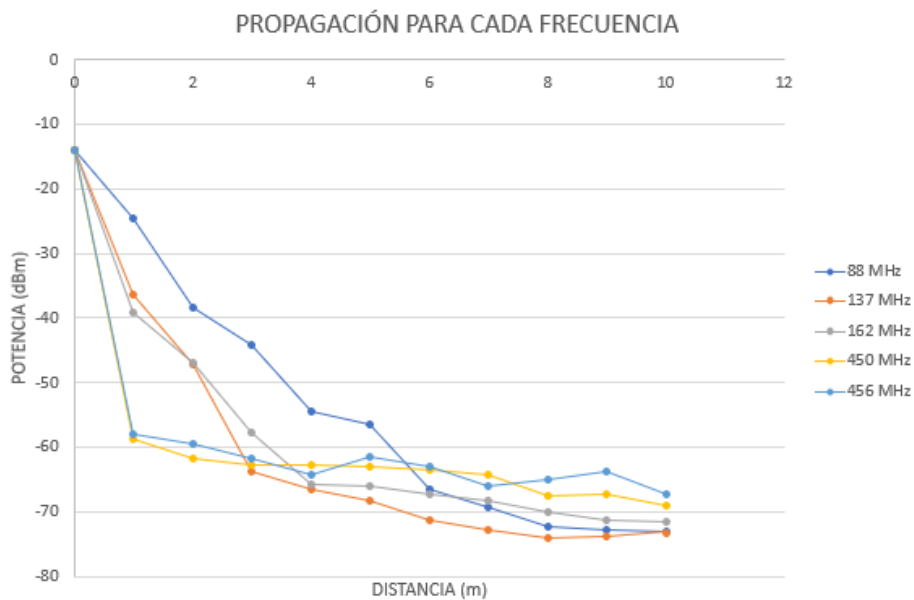


Figura 49. Comportamiento de la propagación de la señal por frecuencias.

La Figura 50 muestra el comportamiento de las señales provenientes de los transmisores deseado e interferente, cuando los elementos transmisores se encuentran a la misma distancia de separación del receptor. Se observa que, al ubicarlas de forma equidistante con el mismo nivel de potencia de transmisión, en un medio LOS existen variaciones medioambientales que afectan la señal a la entrada del receptor.

El receptor capta la señal con mayor intensidad, debido al efecto captura, no obstante, se presentan variaciones de selección por parte del receptor, debido a que, a pesar de que la trayectoria entre transmisor y receptor no posee obstáculos que puedan alterar los valores de potencia recibida, existen factores medioambientales en el medio que pueden causar alteraciones en las señales que viajan hasta el receptor.

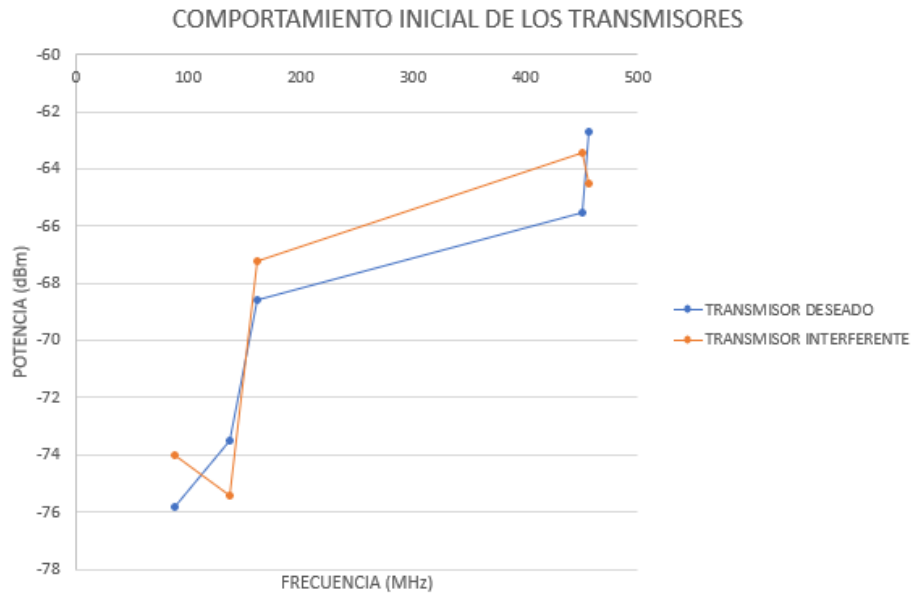


Figura 50. Gráfica de comportamiento inicial de las señales transmitidas.

Luego de obtener los niveles de potencia de recepción, ubicando los transmisores a la misma distancia, se procede a encontrar de forma experimental un valor de relación portadora-interferencia mínimo que le permita al receptor poder estar protegido contra cualquier señal interferente en la misma frecuencia. Esta medida se toma distanciando el transmisor interferente lo suficiente del receptor afectado para que los niveles de potencia interferente no tengan un valor significativo, este valor de relación portadora-interferencia se convierte en el valor de relación de protección mínimo necesario. En la Tabla 18 se observan los valores obtenidos.

Tabla 18. Valores obtenidos al alejar el transmisor interferente.

Frecuencia (MHz)	Relación protección (dB)	Potencia Rx deseada (dBm)	Distancia separación Tx deseado (m)	Potencia Rx interferente (dBm)	Distancia separación Tx interferente (m)
88	4,5	-73	10	-78	15
137	4,3	-72,9	7	-77,2	10
162	4,4	-67,2	6	-71,6	8
450	3,3	-62,8	3	-66	5
456	3,4	-61,7	3	-65,1	5

A partir de los valores obtenidos en la Tabla 18, se visualiza que el valor más alto en cuanto a relación de protección es 4,5 dB, en consideración, se determina por aproximación al valor entero superior, que el valor mínimo aceptable de relación de protección es de 5 dB. Para esta relación de protección se identificó que el receptor capta únicamente la señal deseada sin verse afectado por interferencia alguna proveniente de señales no deseadas operando en la misma frecuencia. También se observa una separación espacial mínima inicial entre el transmisor deseado y el transmisor interferente, teniendo en cuenta el alcance de la señal deseada y sumándole el valor de la distancia a la que se encuentra ubicada el transmisor interferente, se obtiene una separación mínima para sistemas operando a la misma frecuencia, en un medio LOS.

En la Figura 51 se observa el comportamiento de la señal deseada y la señal interferente para cada frecuencia en la que se realizaron las pruebas, comprobando que se capta siempre la señal deseada, por lo que se observa una diferencia en los niveles de potencia entre ambas señales, y se infiere que existe una relación portadora-interferencia que se puede establecer como la relación de protección mínima para mantener una comunicación estable en las diferentes frecuencias evaluadas.

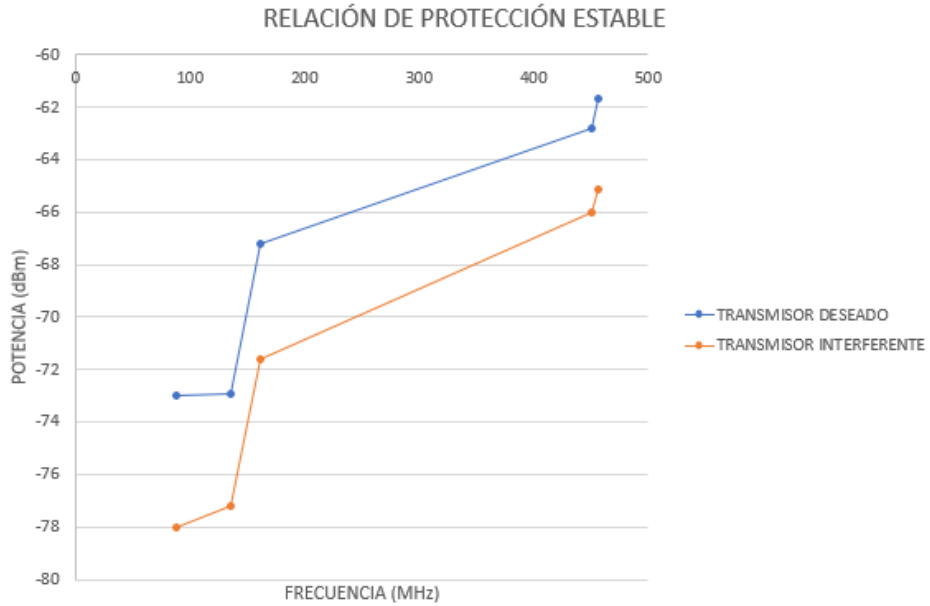


Figura 51. Comportamiento de las señales con valores estables de relación portadora-interferencia en escenario preliminar.

A continuación, se encuentra la distancia que garantiza una relación portadora-interferencia mínima aceptable, en la Figura 52 se observan las distancias a las que se ubicaron los transmisores del receptor, del cual se obtuvieron los valores de relación portadora-interferencia aceptables. Las distancias donde se ubicaron los transmisores parte de la información obtenida en la Tabla 8.

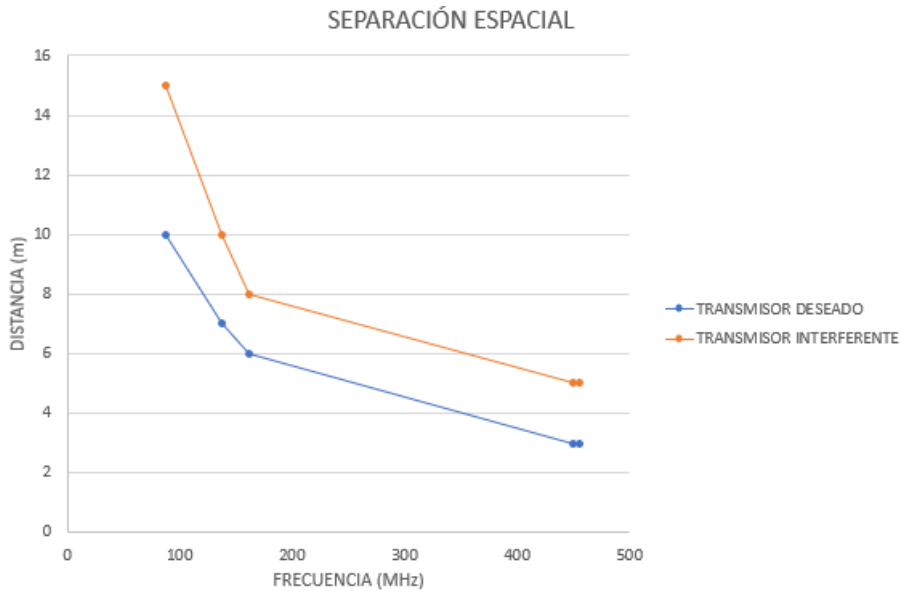


Figura 52. Separación espacial del receptor por frecuencia central.

Haciendo uso de los valores obtenidos en la Tabla 18 se procede a encontrar una zona de protección, y por consiguiente una separación espacial, para el sistema de telecomunicaciones evaluado de forma previa. En la Figura 53 se muestran los parámetros y zonas de protección con los cuales se establece las áreas de servicio, estos resultados están basados en los datos obtenidos en las medidas de la primera etapa.



Figura 53. Zona de protección.

La zona de protección incluye el área de servicio del equipo transmisor definida por su Radio de Servicio (RS) y el anillo que conforma el área de protección de interferencia definida por la Longitud de Protección (LP), obtenida desde el transmisor interferente. Con esto se busca tener una separación espacial que proteja a cualquier sistema de telecomunicaciones de interferencia co-canal generada por otro transmisor que esté operando a la misma frecuencia y al mismo nivel de potencia de transmisión; al sumar RS y LP se obtiene el radio que conforma la zona de protección.

La Tabla 19 muestra los valores obtenidos de forma experimental sobre el área de servicio y área de protección, conformando así la zona de protección empírica producto de tomas de datos experimentales.

Tabla 19. Zonas de protección.

Frecuencia (MHz)	RS (m)	LP (m)	Separación espacial (m)	Área de servicio (m ²)	Área protección (m ²)	Zona protección (m ²)
88	10	15	25	314,2	1.649,3	1.963,5
137	7	10	17	153,9	754	907,9
162	6	8	14	113,1	502,7	615,8
450	3	5	8	28,3	171,7	201,1
456	3	5	8	28,3	171,7	201,1

Como conclusión del análisis de la primera etapa, se observa que un nivel de 5 dB de relación de protección es el indicado para un medio de transmisión en donde no existen obstáculos; sin embargo, en un medio de transmisión a mayor escala, para

un sistema de telecomunicaciones VHF o UHF existen muchos factores que pueden presentar variaciones en el comportamiento de la interferencia de forma extraordinaria que hacen más exigente el nivel de relación de protección requerido para protegerse de señales interferentes, estos factores se observan en la segunda etapa del análisis experimental. Al valor de portadora interferencia encontrado, se adicionan 3 dB más para considerar los factores externos adicionales, que pueda enfrentar el análisis en su segunda etapa y así evitar las variaciones extraordinarias de posibles señales interferentes, teniendo como relación de protección mínimo el valor de 8 dB para sistemas de comunicación VHF y UHF operando a la misma frecuencia.

4.2 PRUEBAS SERVICIO DE RADIO MÓVIL TERRESTRE

En esta sección se obtendrá de forma experimental valores de separación espacial y áreas de servicio, por medio del despliegue de un sistema de telecomunicaciones de radio móvil convencional implementado en la ciudad de Popayán, respetando el valor de relación de protección obtenido en la primera etapa del trabajo de grado. Inicialmente se hará estudio de la mínima separación espacial y luego a través de toma extensiva de datos y de un SIG se obtendrán áreas de servicios, cuando se trabaja en el rango de frecuencias VHF y UHF.

4.2.1 Análisis Experimental de Mínima Separación Espacial

Debido a que los niveles de las señales que viajan en el espacio sufren variaciones constantes por la gran cantidad de variables medioambientales presentes, se hace necesario tomar el valor promedio de los niveles de potencia recibidos por el receptor para realizar el análisis de relación portadora interferencia.

En la Tabla 20 se observan los diferentes valores de potencia promedio calculados para todos los puntos de transmisión y frecuencias evaluadas.

Tabla 20. Valor promedio de potencia de recepción por trayectoria de análisis.

Frecuencia (MHz)	Bomba Coconuco (dBm)	La Intersección (dBm)	El Tránsito (dBm)	Gran Colombia (dBm)	El Cubo (dBm)	Moscopan (dBm)
137	-86,2	-80,5	-75,2	-60,6	-86,1	-82
162	-88,6	-69,7	-75,6	-58,9	-84,3	-83,8
450	----- ⁹	-81,7	-67,1	-78,4	-87,4	-99,4
456	-----	-74,5	-70,1	-75,6	-94,2	-98,8

⁹ La trayectoria estudiada no presenta valores de señal que superen los valores mínimos de sensibilidad para la frecuencia a analizar.

De la Tabla 20 se observa que, al modificar los valores de frecuencia central, utilizando los mismos puntos de transmisión, la potencia percibida por el receptor varía; esto se debe al comportamiento de las señales radioeléctricas en su trayectoria de desplazamiento, en donde, a causa de elementos que existen en el medio de transmisión, se puede generar interferencia constructiva o destructiva dependiendo de la frecuencia.

En seguida se van a comparar dos puntos de transmisión, donde una señal actuara como la deseada y la otra como interferente. Realizando una operación matemática de diferencia entre las potencias promedio de estos dos emplazamientos, se halla un valor de relación portadora-interferencia, el cual debe ser al menos de 8 dB, para que la comunicación respete los mínimos valores de relación de protección, por ende, las mínimas condiciones de separación espacial. Observando el comportamiento de la trayectoria de las señales en sus respectivos emplazamientos; las trayectorias de análisis *El Tránsito* y *Gran Colombia* presentan los mejores desempeños de propagación; por lo tanto, se eligen estos emplazamientos como transmisores deseados y los demás como transmisores interferentes.

En las Tabla 21 y 22 se encuentran las mediciones de valores de relación portadora-interferencia, tomando en cuenta los puntos de transmisión utilizados en las trayectorias de análisis *El Tránsito* y *Gran Colombia* como trayectorias deseadas y los otros emplazamientos como transmisores interferentes. Inicialmente se observa que existen valores de (C/I) negativos, indicando que el receptor víctima está captando la señal interferente proveniente de algún punto de transmisión no deseado; lo que se traduce en interferencia co-canal.

Tabla 21. C/I punto de transmisión: El Tránsito.

Frecuencia operación sistema (MHz)	Punto transmisión deseado	Distancia (Km)	Punto transmisión interferente	Distancia (Km)	C/I (dB)	Separación espacial (Km)
137	El Tránsito	1,15	Bomba Coconuco	1,42	11	2,57
			La Intersección	1,1	5,3	2,25
			El Cubo	1,3	10,9	2,45
			Moscopan	1,2	8	2,35
162	El Tránsito	1,15	Bomba Coconuco	1,42	13	2,57
			La Intersección	1,1	-5,9	2,25
			El Cubo	1,3	8,7	2,45
			Moscopan	1,2	8,2	2,35
450	El Tránsito	1,15	Bomba Coconuco	1,42	-----	-----
			La Intersección	1,1	14,6	2,25
			El Cubo	1,3	20,3	2,45
			Moscopan	1,2	32,6	2,35
456	El Tránsito	1,15	Bomba Coconuco	1,42	-----	-----
			La Intersección	1,1	4,4	2,25
			El Cubo	1,3	24,1	2,45
			Moscopan	1,2	28,7	2,35

Tabla 22. C/I punto de transmisión: Gran Colombia.

Frecuencia operación sistema (MHz)	Punto transmisión deseado	Distancia (Km)	Punto transmisión interferente	Distancia (Km)	C/I (dB)	Separación espacial (Km)
137	Gran Colombia	1,11	Bomba Coconuco	1,42	25,6	2,53
			La Intersección	1,1	19,9	2,21
			El Cubo	1,3	25,5	2,41
			Moscopan	1,2	21,4	2,31
162	Gran Colombia	1,11	Bomba Coconuco	1,42	29,7	2,53
			La Intersección	1,1	10,8	2,21
			El Cubo	1,3	25,4	2,41
			Moscopan	1,2	24,9	2,31
450	Gran Colombia	1,11	Bomba Coconuco	1,42	-----	-----
			La Intersección	1,1	3,3	2,21
			El Cubo	1,3	9	2,41
			Moscopan	1,2	21	2,31
456	Gran Colombia	1,11	Bomba Coconuco	1,42	-----	-----
			La Intersección	1,1	-0,1	2,21
			El Cubo	1,3	18,6	2,41
			Moscopan	1,2	23,2	2,31

Al analizar un solo enlace como el víctima frente a las otras trayectorias posibles como generadores de interferencia, se identifica el comportamiento de las señales transmitidas según la frecuencia a la que estén operando y la trayectoria de viaje que tomen, lo cual deja en evidencia que en el medio de transmisión existen elementos aleatorios que pueden mejorar o, en caso contrario, atenuar los niveles de señal recibida por el receptor interferido, esto afecta de forma directa los valores de relación portadora-interferencia medidos en el centro de monitoreo, indicando la

relación entre la frecuencia de operación, el medio de transmisión, las condiciones de infraestructura del sistema y la relación portadora interferencia; esto se puede observar en las variaciones que sufre la señal captada en la misma trayectoria de análisis en repetidas ocasiones.

Una vez obtenidos los valores de relación portadora interferencia aceptables que aíslen contra la interferencia co-canal, se procede a definir la mínima separación espacial entre la sección de área de servicio establecida por la trayectoria de análisis víctima, a través del dispositivo de recepción y el elemento interferente. En la Figura 54 se propone un esquema de aislamiento que permite ajustar ZP (Zona de Protección) para el receptor afectado; en este caso se utilizan los valores de separación espacial encontrados experimentalmente para establecer la separación total que debe existir entre los transmisores operando a la misma frecuencia.

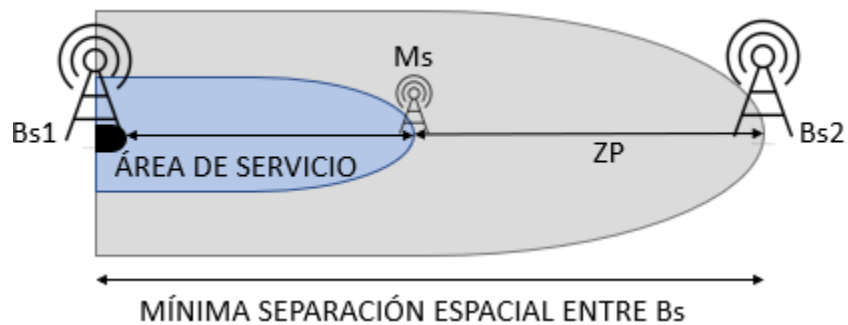


Figura 54. Esquema de aislamiento.

Identificando el origen del generador de interferencia y teniendo en cuenta el medio de transmisión y la trayectoria de la señal de los elementos involucrados, se puede encontrar un valor de relación portadora interferencia aceptable como relación de protección. Adicionalmente a través de las distancias medidas en las Tablas 21, y 22 se puede determinar la separación mínima que debe existir para que la comunicación se pueda garantizar entre el transmisor y el receptor deseado, esto cubriendo una sección a la que se le puede determinar trayectoria de área de servicio, y la zona de protección. El aislamiento encontrado se determina con respecto al origen de las fuentes interferentes y a la trayectoria de las señales involucradas y procura abarcar todas las frecuencias utilizadas en el análisis experimental; en las Tablas 23 y 24 se plasman las distancias de mínima separación espacial entre sistemas operando a una misma frecuencia en VHF y UHF.

Tabla 23. Mínima separación espacial: trayectoria El Tránsito.

Trayectoria: El Tránsito			
Bandas de frecuencia	Trayectoria de área de servicio (Km)	Zona de protección (Km)	Mínima separación espacial entre Bs (Km)
137	1,15	1,2	2,35
162	1,15	1,2	2,35
450	1,15	1,1	2,25
456	1,15	1,2	2,35

Tabla 24. Mínima separación espacial: trayectoria Gran Colombia.

Trayectoria: Gran Colombia			
Bandas de frecuencia	Trayectoria del área de servicio (Km)	Zona de protección (Km)	Mínima separación espacial entre Bs (Km)
137	1,11	1,1	2,21
162	1,11	1,1	2,21
450	1,11	1,3	2,41
456	1,11	1,3	2,41

En general, para que un transmisor brinde el servicio de radio móvil convencional trabajando dentro del rango de frecuencias de interés a 36 dBm sin verse afectado por generadores de interferencia con las mismas características de operación, debe estar ubicado al menos a 2,41 kilómetros de distancia del transmisor deseado, esta distancia garantiza que el sistema de comunicación no se vea afectado por interferencia co-canal, considerando un nivel de sensibilidad en el receptor afectado de 100 dBm .

Una vez obtenidos los valores de aislamiento experimental, se requiere encontrar a través del método de aislamiento teórico y los modelos de pérdidas de propagación empíricos un aislamiento que mejor se ajuste a los valores experimentales encontrados. Inicialmente se toman valores y parámetros de los elementos involucrados en el análisis experimental para iniciar los cálculos de aislamiento teórico y empírico. Los valores del sistema de telecomunicaciones usado se encuentran en la Tabla 25.

Tabla 25. Valores y parámetros utilizados en la comparación entre métodos analíticos y experimentales.

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión interferente	33.85 dBm
Relación de protección	8 dB
Sensibilidad del receptor interferido	-100 dBm
Ganancia de antena transmisora interferente	2,15 dBi
Ganancia de antena de recepción interferida	3 dBi
Frecuencias	137 - 162 - 450 - 456 MHz
Altura de antena transmisora interferente	2 m
Altura de la antena receptora interferida	27 m
Margen de operación para sistemas con múltiples portadoras MC_{int}	0 dB
Factor de ajuste de ancho de banda (dB_{bw})	0 dB
OCR	0 dB
Factor de disponibilidad del sistema interferido (N)	3 dB 10 dB 20 dB
Mascara espectral	Tipo D (12 KHz)

Una vez caracterizado el sistema se calcula el valor teórico de aislamiento requerido, esto según los métodos de análisis de interferencia de la recomendación ITU-R SM.337-6, MCL y E-MCL a través de la ecuación 42 obteniendo los resultados plasmados en la Tabla 26.

Tabla 26. Valor de aislamiento teórico requerido.

Aislamiento teórico	
Coeficiente N (dB)	Valor de aislamiento (dB)
3	149,2
10	139,6
20	129,1

Con los valores obtenidos de la Tabla 26 se procede a encontrar la distancia de aislamiento requerida, esto con modelos de pérdidas de propagación empíricos, obteniendo los siguientes resultados.

4.2.1.1 Modelo de Pérdidas de Propagación de Espacio Libre

A través de la operación de la ecuación 47 se utiliza los valores de frecuencia de análisis y los valores obtenidos de aislamiento calculados en la Tabla 26 para identificar la distancia de separación de interés (Tabla 27).

$$l_p(dB) = 32,45 + 20 \log[f(MHz)] + 20 \log[d (Km)]. \quad (47)$$

Tabla 27. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación de Espacio Libre.

N (dB)	Separación en distancia (Km)			
	137 (MHz)	162 (MHz)	450 (MHz)	456 (MHz)
3	5.020	4.246	1.528	1.508
10	1.662	1.405	506	500
20	496	419	151	149

4.2.1.2 Modelo de Pérdidas de Propagación Okumura-Hata

A partir de los resultados de aislamientos de la Tabla 26, las distancias de separación espacial se despejan de la ecuación 48, en donde intervienen las características de los transmisores interferentes, en este caso se utilizan los puntos de transmisión de las trayectorias de análisis; por otro lado, el receptor víctima, el cual está representado por el centro de monitoreo, también las frecuencias de operación de análisis y el tipo de escenario en el cual se encuentran los dispositivos involucrados, para el valle de Pubenza se elige un medio de tipo urbano de ciudad mediana; los resultados se plasman en las Tablas 28, 29, 30 y 31.

$$L_{urbana}(dB) = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{te}) \log d. \quad (48)$$

Tabla 28. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Okumura-Hata a 137 MHz.

Separación en distancia (Km)				
N(dB)	137(MHz)			
	Bomba Coconuco	La Intersección	El Cubo	Moscopan
3	780	482,7	57,8	188,6
10	380,1	242,2	33,3	108,7
20	185,1	121,6	19,2	62,6

Tabla 29. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Okumura-Hata a 162 MHz.

Separación en distancia (Km)				
N(dB)	162(MHz)			
	Bomba Coconuco	La Intersección	El Cubo	Moscopan
3	800	494	59,1	185,8
10	383,8	244,5	33,7	109,4
20	186,9	122,7	19,4	67,1

Tabla 30. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Okumura Hata a 450 MHz.

Separación en distancia (Km)				
N(dB)	450(MHz)			
	Bomba Coconuco	La Intersección	El Cubo	Moscopan
3	848,9	523,3	63,6	276,1
10	425,5	269,9	37,4	162,6
20	199,9	130,9	21	91,1

Tabla 31. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Okumura Hata a 456 MHz.

Separación en distancia (Km)				
N(dB)	456(MHz)			
	Bomba Coconuco	La Intersección	El Cubo	Moscopan
3	849,7	523,7	63,7	277,4
10	425,8	270,2	37,5	163,4
20	200	131	21	91,6

4.2.1.3 Modelo de Pérdidas de Propagación de Dos Rayos

Por medio de operación en la ecuación 49 y los valores de aislamientos obtenidos en la Tabla 26, se utilizan las características de los puntos de transmisión de las trayectorias de análisis como generadores de interferencia y las características del centro de monitoreo como receptor interferido, para encontrar las distancias de aislamiento requeridas según el modelo de pérdidas de propagación de dos rayos (Tabla 32).

$$l_p(dB) = 40 \log d - (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r). \quad (49)$$

Tabla 32. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación de Dos Rayos.

Separación en distancia (Km)				
N(dB)	Bomba Coconuco	La Intersección	El Cubo	Moscopan
	3	269,1	210,6	49,2
10	154,8	121,2	28,3	33,8
20	84,6	66,2	15,4	18,4

4.2.1.4 Modelo de Pérdidas de Propagación de Pendiente Única

Con un valor n de 3.5 para un escenario de tipo urbano en la ecuación 50, se obtienen los valores de aislamiento requerido según el modelo de pérdidas de propagación de pendiente única (Tablas 34, 35, 36 y 37). Este modelo necesita unas pérdidas de referencia, las cuales se obtienen de valores experimentales (Tabla 33), esto se logra a través del cálculo de diferencia entre los niveles de salida de las trayectorias de análisis y los niveles de señal recibidos en el centro de monitoreo (ecuación 51).

$$L_b = L_0 + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right). \quad (50)$$

$$L_0 \text{ (dB)} = 36 \text{ (dBm)} - P_{Rx} \text{ (dBm)}. \quad (51)$$

Tabla 33. Pérdidas de referencia (Lo) obtenidas experimentalmente.

Pérdidas de referencia Lo (dB)				
Frecuencia (MHz)	Bomba Coconuco	La Intersección	El Cubo	Moscopan
137	122,2	116,5	122,1	118
162	124,6	105,7	120,3	119,8
450	-----	117,7	123,4	135,4
456	-----	110,5	130	134,8

Tabla 34. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación de Pendiente Única a 137 MHz.

Separación en distancia (Km)				
N(dB)	Frecuencia de transmisión 137(MHz)			
	Bomba Coconuco	La Intersección	El Cubo	Moscopan
3	8,4	3,5	7,8	9,4
10	4,5	5	4,1	5
20	2,3	2,5	2,1	2,5

Tabla 35. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación de Pendiente Única a 162 MHz.

Separación en distancia (Km)				
N(dB)	Frecuencia de transmisión 162(MHz)			
	Bomba Coconuco	La Intersección	El Cubo	Moscopan
3	7,1	19,2	8,7	8,3
10	3,8	10,2	4,6	4,4
20	1,9	5,1	2,3	2,2

Tabla 36. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación de Pendiente Única a 450 MHz.

Separación en distancia (Km)			
N(dB)	Frecuencia de transmisión 450(MHz)		
	La Intersección	El Cubo	Moscopan
3	8,7	7,1	3
10	4,6	3,7	1,6
20	2,3	1,9	1,4

Tabla 37. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación de Pendiente Única a 456 MHz.

Separación en distancia (Km)			
N(dB)	Frecuencia de transmisión 456(MHz)		
	La Intersección	El Cubo	Moscopan
3	14	4,6	3,1
10	7,5	2,5	1,7
20	3,7	1,5	1,44

4.2.1.5 Modelo de Pérdidas de Propagación Egli

Haciendo uso de los valores de aislamiento en dB y de la ecuación 52 se logra encontrar los valores de separación espacial requeridos por frecuencia de operación y características del transmisor interferente (Tabla 38, 39, 40 y 41), esto haciendo uso de las condiciones de transmisión de los equipos utilizados en las trayectorias de análisis.

$$L_p = 40 \log(d) - 20 \log(h_t) + 20 \log(f) + lm \quad (52)$$

Tabla 38. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Egli a 137 MHz.

Separación en distancia (Km)				
N(dB)	Frecuencia de transmisión 137(MHz)			
	Bomba Coconuco	La Intersección	El Cubo	Moscopan
3	163,7	128,1	29,9	35,7
10	94,2	73,7	17,2	20,5
20	51,4	40,2	9,4	11,3

Tabla 39. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Egli a 162 MHz.

Separación en distancia (Km)				
N(dB)	Frecuencia de transmisión 162(MHz)			
	Bomba Coconuco	La Intersección	El Cubo	Moscopan
3	150,5	117,8	41,8	32,7
10	86,6	67,8	24,2	18,9
20	47,3	37,1	13,2	10,3

Tabla 40. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Egli a 450 MHz.

Separación en distancia (Km)				
N(dB)	Frecuencia de transmisión 450(MHz)			
	Bomba Coconuco	La Intersección	El Cubo	Moscopan
3	90,3	70,7	16,5	19,7
10	51,9	40,6	9,5	11,4
20	28,3	22,3	5,2	6,2

Tabla 41. Separación espacial modelo de pérdidas de propagación Egli a 456 MHz.

Separación en distancia (Km)				
N(dB)	Frecuencia de transmisión 456 (MHz)			
	Bomba Coconuco	La Intersección	El Cubo	Moscopan
3	89,7	70,2	16,4	19,6
10	51,6	40,4	9,5	11,3
20	28,2	22,1	5,2	6,2

A continuación, se seleccionan las mínimas separaciones espaciales (Tabla 42) entre el transmisor interferente y el receptor víctima por frecuencia de operación y modelo de pérdidas de propagación; los cuales serán utilizados en un proceso comparativo con los resultados obtenidos experimentalmente.

Tabla 42. Mínimas separaciones elegidas por modelo de pérdidas.

Mínima separación teórica entre receptor víctima y transmisor interferente (Km)					
Frecuencia	Pendiente Única	Egli	Dos Rayos	Okumura Hata	Espacio Libre
137	2,1	9,4	15,4	19,2	496
162	1,9	10,3	15,4	19,4	419
450	1,4	5,2	15,4	21	151
456	1,44	5,2	15,4	21	149

Una vez obtenidos los valores teóricos de aislamiento entre el receptor víctima y el transmisor interferente se procede a calcular la distancia teórica de alcance entre el transmisor deseado y el receptor víctima a partir de los valores de atenuación obtenidos experimentalmente en la Tabla 43.

Tabla 43. Pérdidas por propagación transmisores deseados.

Valores de atenuación trayectorias deseadas (dB)		
Frecuencia (MHz)	El Tránsito	Gran Colombia
137	111,2	96,6
162	111,6	94,9
450	103,1	114,4
456	106,1	111,6

Los resultados de alcance de propagación teórica por trayectoria deseada se encuentran plasmados en las Tablas 44 y 45 según el emplazamiento, la frecuencia de operación y el modelo de pérdidas de propagación.

Tabla 44. Separación entre emplazamiento El Tránsito y receptor víctima.

Trayectoria de análisis teórica El Tránsito					
Frecuencia (MHz)	Espacio Libre (Km)	Okumura Hata (Km)	Dos Rayos (Km)	Egli (Km)	Pendiente Única (Km)
137	63,2	10	8,3	5,1	1,15
162	55,9	10,3	8,5	4,7	1,15
450	7,6	6,5	5,2	1,7	1,15
456	10,5	7,8	6,2	2,1	1,15

Tabla 45. Separación entre emplazamiento Gran Colombia y receptor víctima.

Trayectoria de análisis teórica Gran Colombia					
Frecuencia (MHz)	Espacio Libre (Km)	Okumura Hata (Km)	Dos Rayos (Km)	Egli (Km)	Pendiente Única (Km)
137	11,7	4,2	3,6	2,2	1,11
162	8,2	3,9	3,3	1,8	1,11
450	27,8	12,7	9,9	3,4	1,11
456	19,9	10,7	8,5	2,8	1,11

Una vez calculados los valores de ZP (Tabla 42) y trayectoria de área de servicio teóricos (Tablas 44 y 45); se procede a obtener los valores de mínima separación espacial entre estaciones base operando a la misma frecuencia de forma teórica, considerando trayectoria, frecuencia y modelo de pérdidas de propagación (Tablas 46 y 47); adicionalmente, se incluyen los valores obtenidos experimentalmente, con

el objetivo de comparar y encontrar una relación entre los resultados experimentales y los teóricos.

Tabla 46. Mínimo aislamiento entre estaciones base para trayectoria El Tránsito.

Mínima separación espacial entre sistemas operando a 4 W (Km)						
Frecuencia (MHz)	El Tránsito	Pendiente Única	Egli	Dos Rayos	Okumura -Hata	Espacio Libre
137	2,35	3,25	14,5	23,7	29,2	560
162	2,35	3,1	15	23,9	29,5	475
450	2,25	2,55	6,9	20,6	27,5	158,7
456	2,35	2,6	7,3	21,6	28,8	159,5

Tabla 47. Mínimo aislamiento entre estaciones base para trayectoria Gran Colombia.

Mínima separación espacial entre sistemas operando a 4 W (Km)						
Frecuencia (MHz)	Gran Colombia	Pendiente Única	Egli	Dos Rayos	Okumura -Hata	Espacio Libre
137	2,21	3,21	11,6	19	23,4	507,7
162	2,21	3	12,1	18,7	23,1	427,2
450	2,41	2,51	8,6	25,3	33,7	179
456	2,41	2,55	8	23,9	31,7	169

Basándose en los resultados obtenidos de comparación, se identifica que el modelo de pérdidas de propagación de pendiente única es el modelo que más se acerca a los datos tomados experimentalmente, esto debido a que este modelo estima pérdidas basado en los resultados de pérdidas de propagación de referencia obtenidos de forma experimental, teniendo en cuenta de forma indirecta la mayor cantidad de factores aleatorios externos posibles dentro del medio y la trayectoria de propagación. Los resultados obtenidos y el comportamiento del sistema de telecomunicaciones a lo largo de este trabajo de grado, se plantea un procedimiento empírico que permite evaluar la interferencia.

4.2.2 Análisis Experimental de Áreas de Servicio en Sistemas Operando Entre 30 y 466 MHz

Una vez obtenidos los resultados de interpolación de datos con el software QGIS se procede a graficar las áreas de servicio experimentales en las frecuencias VHF y UHF utilizadas en análisis de interferencia; para evaluar el desempeño real de las áreas de servicio del sistema de radio móvil convencional utilizado, se realiza una comparación contra dos casos extremos de modelos de pérdidas de propagación, el modelo de pérdidas de propagación por espacio libre y el modelo de propagación Longley-Rice utilizados por software de simulación de cobertura radioeléctrica, con objetivo es contrastar el comportamiento real que tienen las señales que viajan a través del medio de transmisión.

4.2.2.1 Comparación de la Estimación de Cobertura Experimental Contra la Cobertura Estimada a través del Modelo de Pérdidas de Propagación de Espacio Libre

El modelo de pérdidas de propagación de espacio libre utiliza los valores de frecuencia de operación y la distancia a la que se desea evaluar el valor de pérdida de propagación; sin embargo, este modelo es el más idealizado de todos, debido a que no tiene en cuenta las características de los elementos involucrados del sistema de telecomunicaciones, ni toma en cuenta factores medioambientales del medio de propagación, debido a esto, los alcances estimados por el modelo de pérdidas son extremadamente elevados, siendo éstos muy alejados de la realidad, como se observa en las Figuras 55, 56, 57 y 58; en donde se compara el comportamiento real de las señales en el rango de frecuencia de interés, y el comportamiento simulado bajo el modelo de pérdidas de propagación de espacio libre, en el cual se observan rangos de alcance interdepartamentales para una señal de solo 4 vatios de salida.

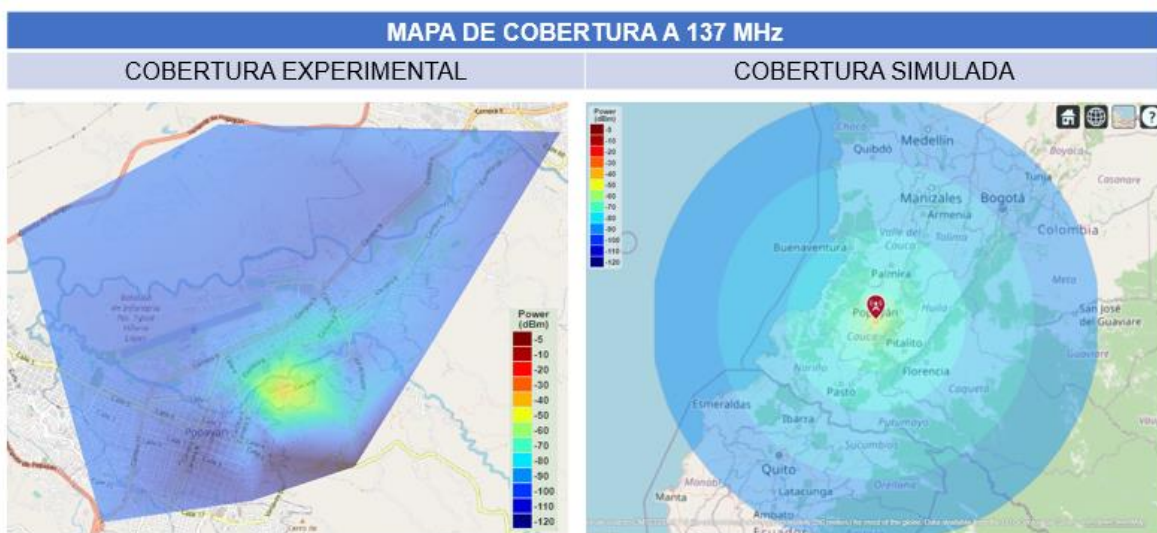


Figura 55. Cobertura experimental a 137 MHz contra el modelo de Espacio Libre.

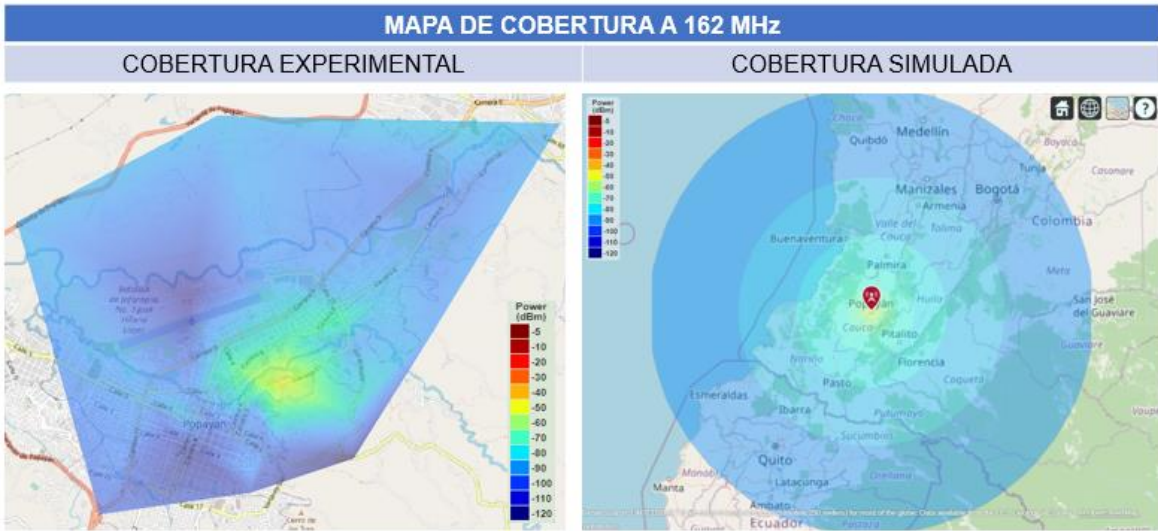


Figura 56. Cobertura experimental a 162 MHz contra el modelo de Espacio Libre.

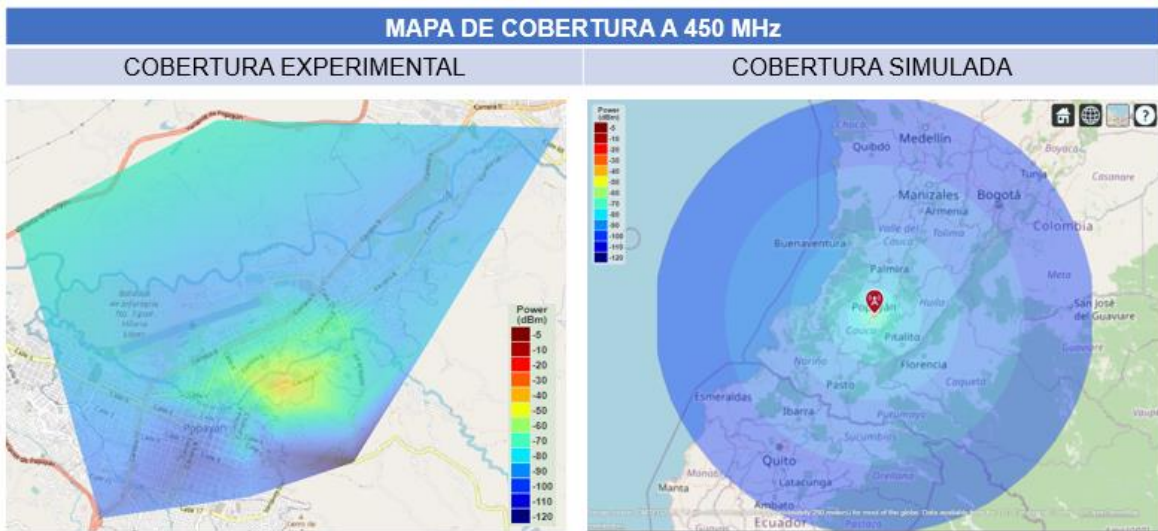


Figura 57. Cobertura experimental a 450 MHz contra el modelo de Espacio Libre.

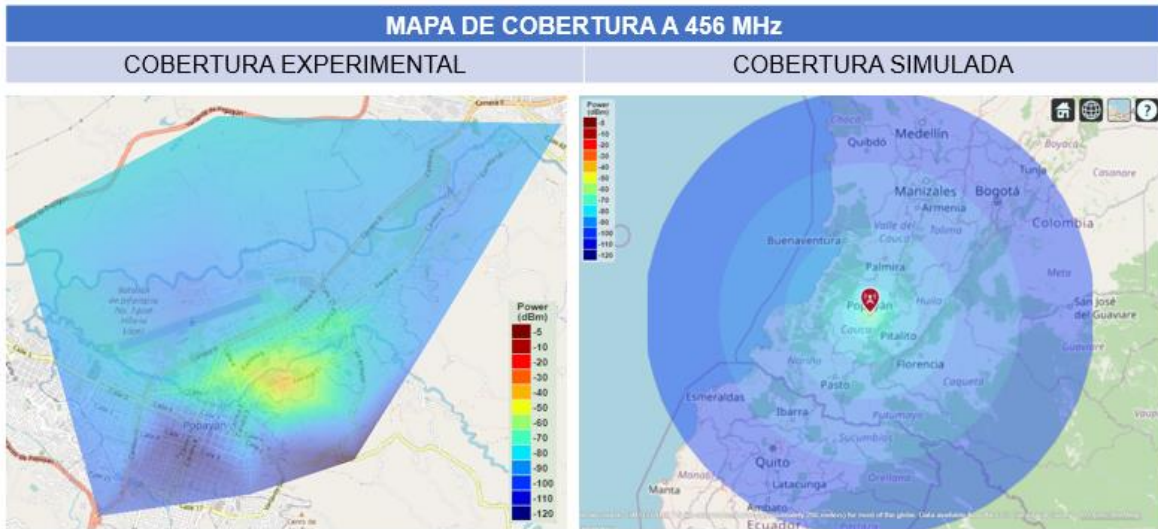


Figura 58. Cobertura experimental a 456 MHz contra el modelo de Espacio Libre.

La comparación de los mapas de cobertura demuestra que existen discrepancias entre el alcance revelado por la cobertura experimental y la cobertura simulada a través del modelo de pérdidas por Espacio Libre, en donde en la simulación, se observan niveles de señal de aproximadamente -120 dBm a distancias de más de 200 kilómetros; sin embargo, el mapa de cobertura experimental demuestra que estos niveles son alcanzados difícilmente aproximadamente a 5 kilómetros del punto de transmisión. Una razón de los resultados obtenidos es sin duda el factor orográfico, ya que el modelo de Espacio Libre no considera las variaciones orográficas presentes en la zona de cobertura; por esto, la señal alcanza mayores distancias de propagación en un entorno simulado.

4.2.2.2 Comparación de la Estimación de Cobertura Experimental Contra la Cobertura Estimada a Través del Modelo de Pérdidas de Propagación Longley-Rice

Uno de los modelos de pérdidas de propagación más utilizados para realizar estimación de cobertura es el modelo de Longley-Rice, se obtiene a través de simulación el área de cobertura en las frecuencias de interés, a pesar de ser un modelo que analiza la variación orográfica del terreno, el modelo puede presentar un determinado nivel de margen de error debido; principalmente, a los obstáculos artificiales y condiciones variables no predecibles en la trayectoria, lo que se puede observar comparando un entorno de simulación con los resultados de cobertura estimada de forma experimental, en las Figuras 59, 60, 61 y 62.

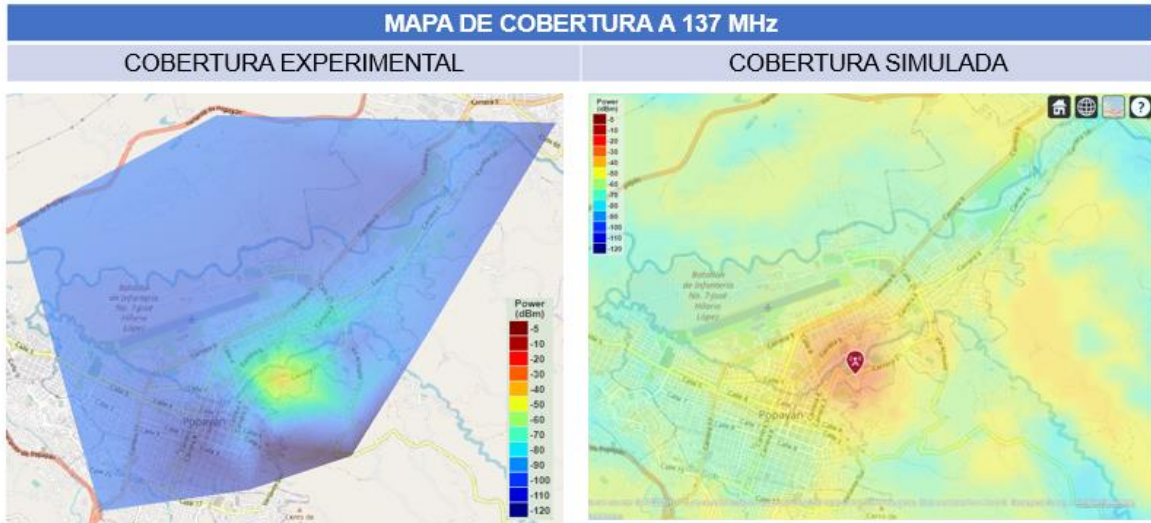


Figura 59. Cobertura experimental a 137 MHz contra el modelo Longley-Rice.

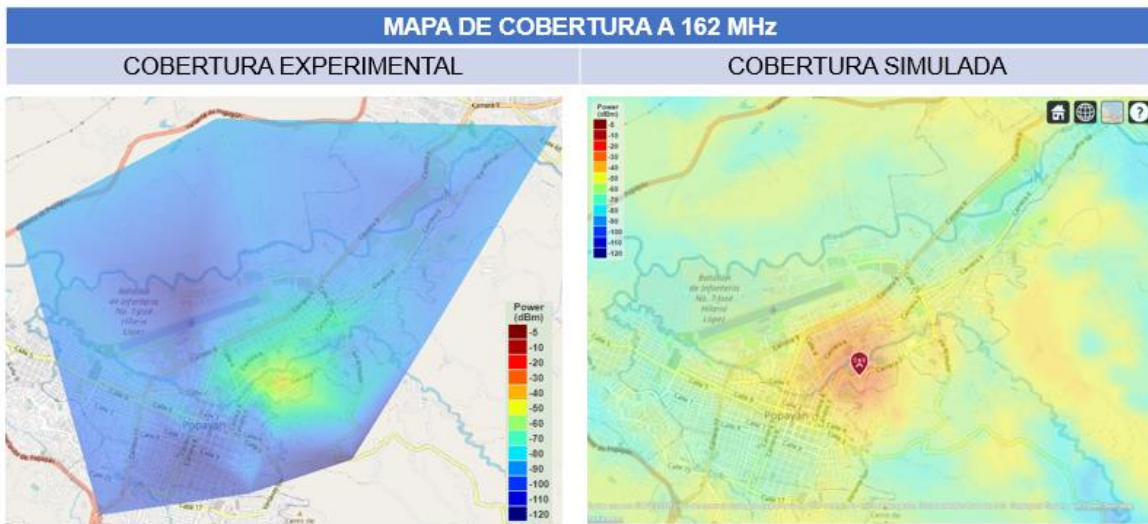


Figura 60. Cobertura experimental a 162 MHz contra el modelo Longley-Rice.

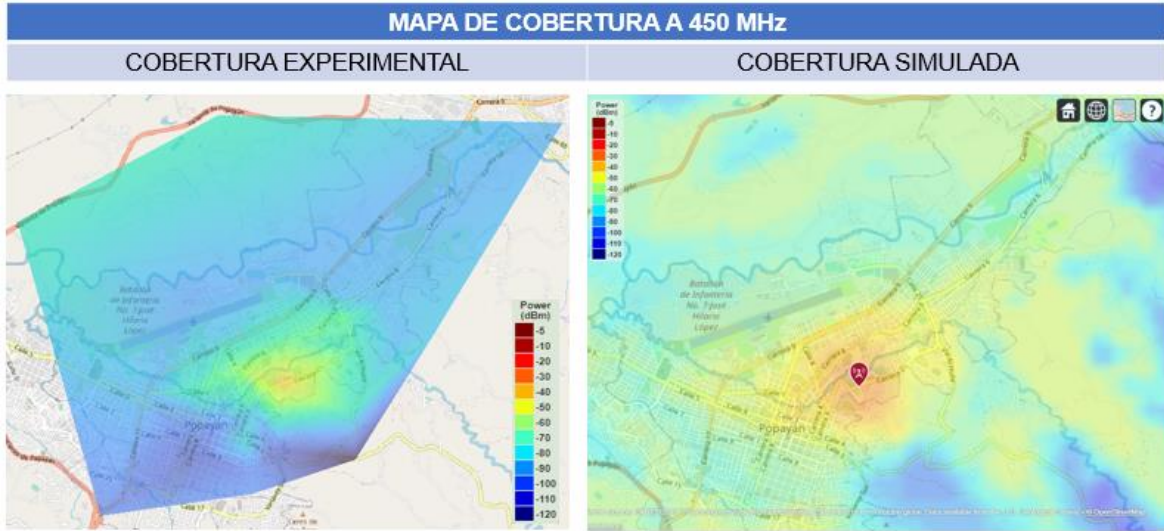


Figura 61. Cobertura experimental a 450 MHz contra el modelo Longley-Rice.

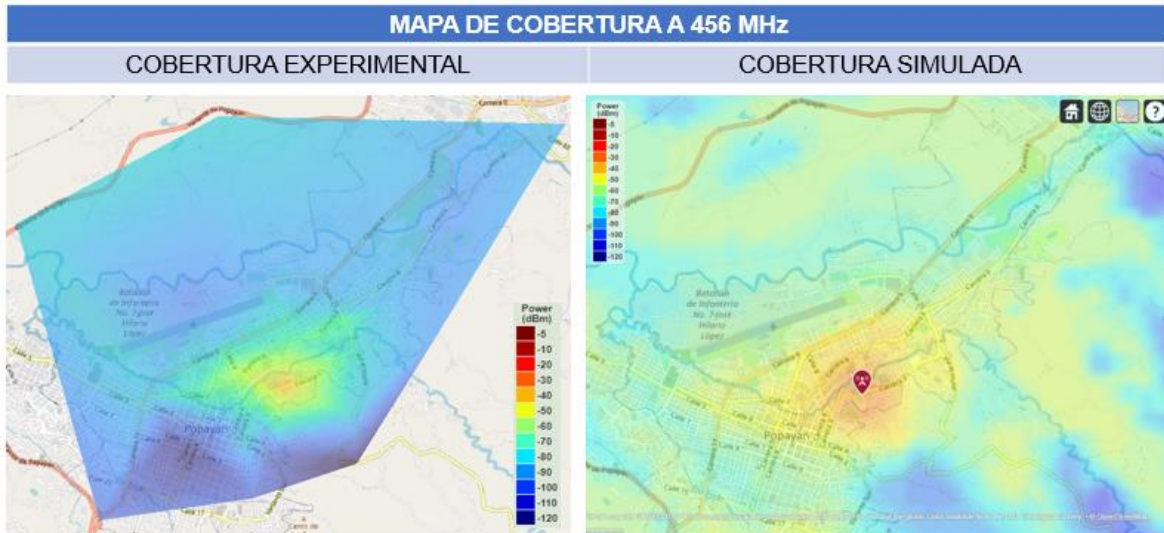


Figura 62. Cobertura experimental a 456 MHz contra el modelo Longley-Rice.

Gráficamente se observa que el comportamiento de la cobertura en cada una de las frecuencias analizadas, es acorde a la orografía por donde se puede desplazar la señal transmitida, sin embargo, son notables las diferencias entre los valores reales de cobertura y los valores encontrados por simulación; para los niveles de potencia medidos en la zona de análisis, el modelo Longley-Rice muestra alcances de la señal y niveles de potencia de recepción más elevados que los niveles reales obtenidos experimentalmente, esto se puede demostrar midiendo la diferencia de niveles de señal entre los valores reales y los valores del modelo de pérdidas de propagación simulado, en las Tablas 48, 49, 50 y 51 se encuentran los valores de potencia medidos de forma experimental y de forma simulada por coordenada tipo *UTM 18N (Universal Transverse Mercator)*, y la respectiva diferencia de potencia para cada uno de los puntos seleccionados.

Tabla 48. Niveles de señal medidos a 137 MHz.

NIVELES DE SEÑAL MEDIDOS A 137 MHz				
Nombre de referencia ubicación de medida	Ubicación geográfica (Latitud, Longitud)	Niveles experimentales de señal obtenidos (dBm)	Niveles simulados de señal obtenidos (dBm)	Diferencia (dBm)
Concesionaria Honda-Novena	2,452856, -76,605592	-104,2	-45,81	58,39
Tablazo Alto	2,478530, -76,576220	-103,3	-51,43	51,87
Iglesia Alianza	2,440992, -76,611575	-115,2	-53,98	61,22
Variante 1 Norte	2,479652, -76,605759	-106,2	-53,04	53,16
Batallón	2,457518, -76,609068	-110	-55,89	54,11
Loma de Cartagena	2,439330, -76,602644	-104,4	-47,73	56,67
Moscopan	2,433788, -76,601703	-116,5	-47,80	68,70
Colegio Madre Laura	2,445873, -76,613802	-111	-48,66	62,34
Parque santa Catalina	2,436591, -76,601364	-113,2	-51,91	61,29
Bomba Coconuco	2,437999, -76,589246	-127,2	-60,16	67,04
Diferencia promedio				59,48

Tabla 49. Niveles de señal medidos a 162 MHz.

NIVELES DE SEÑAL MEDIDOS A 162 MHz				
Nombre de referencia ubicación de medida	Ubicación geográfica (Latitud, Longitud)	Niveles experimentales de señal obtenidos (dBm)	Niveles simulados de señal obtenidos (dBm)	Diferencia (dBm)
Concesionaria Honda-Novena	2,452856, -76,605592	-94,5	-46,01	48,49
Tablazo Alto	2,478530, -76,576220	-90,7	-52,23	38,47
Iglesia Alianza	2,440992, -76,611575	-109,2	-54,17	55,03
Variante 1 Norte	2,479652, -76,605759	-94,3	-53,48	40,82
Batallón	2,457518, -76,609068	-113,8	-56,26	57,54
Loma de Cartagena	2,439330, -76,602644	-102,3	-48,14	54,16
Moscopan	2,433788, -76,601703	-110,2	-48,49	61,71
Colegio Madre Laura	2,445873, -76,613802	-97,1	-48,81	48,29
Parque santa Catalina	2,436591, -76,601364	-96,9	-53,43	43,47
Bomba Coconuco	2,437999, -76,589246	-117	-63,54	53,46
diferencia promedio				50,15

Tabla 50. Niveles de señal medidos a 450 MHz.

NIVELES DE SEÑAL MEDIDOS A 450 MHz				
Nombre de referencia ubicación de medida	Ubicación geográfica (Latitud, Longitud)	Niveles experimentales de señal obtenidos (dBm)	Niveles simulados de señal obtenidos (dBm)	Diferencia (dBm)
Concesionaria Honda-Novena	2,452856, -76,605592	-92,9	-48,01	44,89
Tablazo Alto	2,478530, -76,576220	-94,3	-58,90	35,40
Iglesia Alianza	2,440992, -76,611575	-107,3	-55,98	51,32
Variante 1 Norte	2,479652, -76,605759	-83,3	-59,37	23,83
Batallón	2,457518, -76,609068	-98,8	-59,52	39,28
Loma de Cartagena	2,439330, -76,602644	-91,7	-51,84	39,86
Moscopan	2,433788, -76,601703	-102,3	-58,58	43,72
Colegio Madre Laura	2,445873, -76,613802	-95,4	-50,76	44,64
Parque santa Catalina	2,436591, -76,601364	-105	-62,67	42,33
Bomba Coconuco	2,437999, -76,589246	-122,8	-86,27	36,53
Diferencia promedio				40.18

Tabla 51. Niveles de señal medidos a 456 MHz.

NIVELES DE SEÑAL MEDIDOS A 456 MHz				
Nombre de referencia ubicación de medida	Ubicación geográfica (Latitud, Longitud)	Niveles experimentales de señal obtenidos (dBm)	Niveles simulados de señal obtenidos (dBm)	Diferencia (dBm)
Concesionaria Honda-Novena	2,452856, -76,605592	-92,7	-48,05	44,65
Tablazo Alto	2,478530, -76,576220	-95,4	-59,03	36,37
Iglesia Alianza	2,440992, -76,611575	-114,9	-56,03	58,87
Variante 1 Norte	2,479652, -76,605759	-88,6	-59,45	29,15
Batallón	2,457518, -76,609068	-101,2	-59,59	41,61
Loma de Cartagena	2,439330, -76,602644	-94,2	-51,92	42,28
Moscopan	2,433788, -76,601703	-108,8	-58,77	50,03
Colegio Madre Laura	2,445873, -76,613802	-91,7	-50,89	40,81
Parque santa Catalina	2,436591, -76,601364	-103,8	-62,87	40,93
Bomba Coconuco	2,437999, -76,589246	-121,3	-86,59	34,71
Diferencia promedio				41,94

A pesar de que el modelo Longley-Rice toma en cuenta las características orográficas del medio por el cual se desplaza la señal, los valores de señal percibidos por las mediciones experimentan variaciones de hasta 60 dBm de diferencia con respecto a los modelos simulados; una razón a este comportamiento es la posible influencia de elementos artificiales presentes en la trayectoria de la señal y que el modelo de propagación no puede tomar en cuenta; el margen de error entre los valores de potencia medidos de forma experimental y los valores obtenidos por el modelo de Longley-Rice da cuenta de la necesidad de un factor adicional al modelo de pérdidas, con el fin de permitir ajustar los niveles de señal obtenidos a unos valores más acordes a los reales.

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

Los métodos de análisis de interferencia utilizados para aislar un sistema de telecomunicaciones VHF o UHF convergen a una sola ecuación de balance del enlace; esto bajo las condiciones de sistemas interferentes operando a la misma frecuencia del sistema víctima, ya que debido a la ausencia de un corrimiento de frecuencia y a que la señal interferente posee el mismo ancho de banda de operación del receptor víctima, métodos como MCL y E-MCL presentan valores de factor de conversión de ancho de banda de 0 dB y valores de función de ruido de transmisor interferente de 0 dBc; para el caso de la recomendación ITU-R SM 337-6 su valor de factor de rechazo fuera de canal (OCR) presenta un valor de 0 dB, lo que deja a cada uno de estos métodos con la misma ecuación de balance del enlace y dependiendo estrictamente del valor de relación de protección elegido para el sistema víctima.

Para sistemas de comunicación trabajando con modulación FM en frecuencias VHF y UHF, se concluye que el valor mínimo encontrado de forma experimental de relación de protección es de 8 dB, para evitar interferencia entre dos sistemas de comunicación operando en la misma frecuencia y con el mismo ancho de banda. Se debe entender que este valor de relación de protección es aplicable sólo a sistemas de radio móvil convencional trabajando con un ancho de banda de canal de 12.5 KHz con un nivel de potencia de transmisión de 36 dBm.

El efecto captura es un fenómeno muy importante y debe tenerse en cuenta, ya que facilita la realización del análisis de interferencia en sistemas de comunicación operando a la misma frecuencia; esto a través de técnicas de interpolación, facilitando el proceso de planificación espectral y de reutilización de frecuencias en sistemas VHF y UHF operando con modulación FM, debido a que, si se establecen valores de relación de protección correctos, el receptor puede discriminar de forma efectiva una señal interferente de tipo co-canal, permitiendo una demarcación más aproximada de las áreas de servicio.

La técnica de análisis de interferencia que más se acerca a los valores encontrados experimentalmente, es la que utiliza un modelo de pérdidas de propagación de pendiente única con $n = 3.5$, la cual basa sus pérdidas de referencia en valores obtenidos experimentalmente en el medio donde se despliega el sistema de radio móvil a evaluar; lo cual evidencia que aislar correctamente un sistema VHF o UHF depende, no solo de las características de los elementos involucrados (transmisor interferente o receptor víctima), sino de las características del medio que los rodea; esas características solo se pueden obtener de forma experimental; esto indica que para aislar un sistema de telecomunicaciones de forma eficiente es

necesario realizar trabajo de campo para dar mejor precisión a los métodos teóricos MCL, E-MCL y la recomendación ITU-R 337-6 en el análisis de interferencia co-canal.

Las áreas de servicio de cualquier sistema VHF y UHF no solo dependen de las características de operación de los elementos de transmisión y recepción y de la frecuencia de operación del sistema, si no que dependen directamente de las características del medio de transmisión y la trayectoria que toma la señal transmitida. Es decir, con el tiempo los valores de propagación pueden cambiar dependiendo de los elementos orográficos e infraestructura que se modifiquen en la trayectoria de transmisión de las señales operando en VHF o UHF

Las áreas de servicio encontradas de forma experimental muestran un patrón de cobertura inferior a los estimados por simulación, demostrando que el modelo Longley-Rice a pesar de ser altamente utilizado en ámbitos de planificación espectral, presenta niveles de señal aproximadamente de 50 dBm por encima de los medidos en VHF y 40 dBm por encima para UHF, como respuesta a los resultados obtenidos se determina que la existencia de elementos como obstáculos artificiales, que no pueden ser tenidos en cuenta por el modelo Longley-Rice, provoca una atenuación adicional sobre los niveles de señal que modifican el área de servicio.

Debido a que los niveles de potencia de transmisión utilizados en el análisis experimental fueron de 36 dBm (4 W, nivel mínimo utilizado para radio móvil privado, según el visor del espectro de la ANE), se requiere analizar sistemas de comunicación operando con niveles de potencia de al menos 25 W que brinden un mayor alcance; ya que por las dimensiones del sistema desplegado, este análisis no alcanza a evaluar la interacción de la señal deseada e interferente con factores que pueden afectar los niveles de señal en el receptor a largas distancias, como lo puede ser la curvatura de la tierra y las alteraciones troposféricas que pueden presentarse a causa de cambios de temperatura y presión en grandes extensiones espaciales.

De los resultados de mínima separación espacial obtenidos, se concluye que las señales operando en las frecuencias de análisis requieren de al menos 2,41 Km de separación entre estaciones base operando a la misma frecuencia sin verse afectados por interferencia co-canal; esto teniendo en cuenta que el receptor trabaja a -100 dBm de sensibilidad.

5.2 RECOMENDACIONES.

- Al implementar un análisis de mínima separación espacial entre sistemas operando a la misma frecuencia, se recomienda tomar en cuenta múltiples orígenes de interferencia, ya que, en un medio de transmisión real las trayectorias utilizadas por las señales pueden favorecer o atenuar los niveles captados por el receptor, por lo tanto, la interferencia co-canal puede variar dependiendo del lugar de donde proviene, haciendo más susceptible al receptor.
- Para utilizar métodos indirectos de análisis de interferencia como la interpolación por efecto captura se debe tener en cuenta que únicamente es factible si se realizan para analizar sistemas operando a la misma frecuencia.
- Debido a la ley de garantías por elecciones presidenciales, no fue posible obtener recursos económicos de la ANE; esto generó muchas limitaciones logísticas y de infraestructura que hicieron necesario optar por alternativas que permitiesen tomar medidas de manera indirecta.
- Se debe tener en cuenta que durante el proceso de medición de mínima separación espacial el receptor fue el que permaneció estático y los transmisores fueron los elementos que estaban móviles, considerando que en una arquitectura normal los receptores son móviles a baja altura y los transmisores estáticos con gran altura.

5.3 TRABAJOS FUTUROS.

- Dron prototipo de estimación de áreas de servicios en sistemas de telecomunicaciones operando desde 30 a 466 MHz.
- Herramienta software de análisis de interferencia en sistemas de telecomunicaciones operando a la misma frecuencia de 30 a 466 MHz.
- Análisis experimental de áreas de servicio e interferencia y mínima separación espacial para sistemas de comunicación operando en la misma frecuencia de 30 MHz a 466 MHz con transmisores de 25 W.
- Validación de métodos indirectos de análisis experimental de áreas de servicio e interferencia y mínima separación espacial para sistemas de comunicación operando en la misma frecuencia de 30 MHz a 466 MHz con transmisores de 25 W.

REFERENCIAS

- [1] CONGRESO DE COLOMBIA, "LEY 1978 DE 2019," ed, 2019.
- [2] European Radiocommunications Committee (ERC) and European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), "A COMPARISON OF THE MINIMUM COUPLING LOSS METHOD, ENHANCED MINIMUM COUPLING LOSS METHOD, AND THE MONTE-CARLO SIMULATION," Menton, ERC REPORT 101, 1999.
- [3] *Separaciones en frecuencia y distancia*, Rec. UIT-R SM.337-6, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2020.
- [4] Víctor Olaya, *Sistemas de Información Geográfica*. 2014.
- [5] Javier Luque Ordoñez, "Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico.," *autores científicos-técnicos y académicos*,
- [6] Unión Internacional de Telecomunicaciones, *Directrices de política y aspectos económicos de asignación y uso del espectro radioeléctrico*. 2016.
- [7] Javier Pérez Trigo, *Introducción a Los Sistemas Móviles de Comunicaciones*. Universidad de Salamanca,.
- [8] U. I. d. Telecomunicaciones, *Directrices de política y aspectos económicos de asignación y uso del espectro radioeléctrico*. 2016.
- [9] Agencia Nacional del Espectro, "Cuadro Nacional de Atribución de Bandas del Espectro," ed. Colombia, 2022.
- [10] Wayne Tomasi, *SISTEMAS DE COMUNICACIONES ELECTRONICAS*, P. EDUCACIÓN, ed., 2003.
- [11] E. O. N. Astudillo, "Herramienta prototipo software de estimación de cobertura radioeléctrica para la planificación de una red IoT.," Universidad del Cauca, 2020.
- [12] J. M. R. S. José María Hernando Rábanos, Luis Mendo Tomas., *Transmisión por radio* (no. 7). Editorial universitaria Ramon Aceres, .
- [13] T. A. B. Juan Jose Tobar Muñoz, "Análisis de Área de servicio e Interferencia en Sistemas de Comunicación en Frecuencias de 30 MHz a 466 MHz en Colombia," 2022.
- [14] Real Academia Española de la Lengua, "Orografía," ed, 2022.
- [15] J. Z. Z. d. I. M. Constantino Pérez Vega, Alicia Casanueva López, *Sistemas de Telecomunicación*, . Universidad de Cantabria, 2008.
- [16] *UIT-R P.834-9 Efectos de la refracción troposférica sobre la propagación de las ondas radioeléctricas*,. Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2017.
- [17] *ITU-R P.453-14 Índice de refracción radioeléctrica: su fórmula y datos sobre la refractividad*,. Union Internacional de Telecomunicaciones, 2019.
- [18] Consorcio Provincial de Bomberos de Valencia, "Tema 5 comunicaciones,," in *Curso para bomberos de nuevo Ingreso*,. 2010.
- [19] M. T. T. Oscar Ibarra Manzano, H. García Tapia, R. Pelanis, J. Sánchez Mondragón,, "Fresnel ellipsoids, reflection, refraction and scattering in a telecommunication network design,,"
- [20] E. A. D. Sergio Vidal Beltrán, José Luis López,, "Modelo de propagación simplificado para LTE en la frecuencia de 2.1GHz," *Nova Scientia*, vol. 9,
- [21] *Calculation of free-space attenuation*, Rec. ITU-R P.525-4, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2019.
- [22] *Modelos de propagación*, Universidad de las Américas Puebla, 2015. [Online]. Available:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/trevino_c_jt/capitulo5.pdf
- [23] *Modelo para Estimación de Pérdidas de Propagación en Sistema de Televisión Digital Abierta*, 1815-5928, J. M. T. Ángel D. Pinto, Alberto S. García Bello, Nelson

- A. Pérez, José R. Uzcátegui, 2016. [Online]. Available: <http://scielo.sld.cu/pdf/eac/v37n2/eac06216.pdf>
- [24] *Wireless Communications*, T. S. Rappaport, 2002.
- [25] ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UN SOFTWARE DE MODELOS Y SIMULACIÓN DE UN CANAL MÓVIL PARA LAS BANDAS DE 850 MHz. Y 1900 MHz, CHRISTIAN OMAR CEVALLOS TIPÁN, Sangolquí - Ecuador, 2006. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/97/1/T-ESPE-014277.pdf>
- [26] Jose Maria Drake Moyano, "ruidos e interferencias: Técnicas de reducción," in *instrumentalización electrónica de telecomunicaciones*.
- [27] *Recomendación UIT-R P.372-8 Ruido Radioeléctrico.*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2003.
- [28] Marco Tulio Herrarte Romero, "INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN LAS ANTENAS DE TELECOMUNICACIONES," Facultad de Ingeniería, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, 2013. [Online]. Available: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0344_EO.pdf
- [29] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), Agencia Nacional del Espectro (ANE), and Unión Internacional de las Telecomunicaciones (UIT), *MANUAL DE GESTIÓN NACIONAL DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO: Título II - Ingeniería del espectro radioeléctrico*, Colombia, 2012.
- [30] R. V. A. Julio Elmer Londoño García, "Análisis de cobertura de un sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico empleando control de potencia y movilidad de usuarios.," 2014.
- [31] *Recomendación UIT-R SM.1446 Definición y medición de los productos de intermodulación en transmisores que utilizan las técnicas de modulación de frecuencia, de fase o compleja.*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2000.
- [32] Paulina Cumandá Yáñez Arias, "Estudio de los canales con desvanecimiento sobre redes fijas y móviles en sistemas de radiocomunicación," Departamento de ingeniería eléctrica y electrónica, Escuela Politécnica Nacional, 2009. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1455/1/CD-2729.pdf>
- [33] Juan José Murillo Fuentes, *fundamentos de radiación y radiocomunicación*. 2013.
- [34] F. T. R. Francesc Rey Micolau, *Comunicaciones Analógicas : modulaciones AM y FM*, Universitat Oberta de Catalunya. [Online]. Available: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/69406/5/Sistemas%20de%20comunicaci%C3%B3n%20I%20M%C3%B3dulaci%C3%B3n%20de%20Comunicaciones%20anal%C3%B3gicas%20modulaciones%20AM%20y%20FM.pdf>.
- [35] *ITU-R F.1093-1 Efectos de la propagación multitrayecto en el diseño y funcionamiento de los sistemas de radioenlaces digitales con visibilidad directa.*, Unión internacional de Telecomunicaciones, 1997.
- [36] *RELACIONES DE PROTECCIÓN EN RADIOFRECUENCIA PARA SISTEMAS DE TELEVISIÓN TERRENAL CON MODULACIÓN DE AMPLITUD DE BANDA LATERAL RESIDUAL INTERFERIDOS POR SEÑALES DE IMAGEN ANALÓGICAS NO DESEADAS Y SUS SEÑALES DE SONIDO ASOCIADAS - Rec. UIT-R BT.655-5*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 1998.
- [37] *Procedimiento de prueba para medir la sensibilidad de los receptores de comprobación técnica radioeléctrica que utilizan señales con modulación analógica - RECOMENDACIÓN UIT-R SM.1840-0*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2007.
- [38] *UIT-R SM.852 sensibilidad en los receptores radioeléctricos para la clase F3E*, U. I. d. Telecomunicaciones, 1992.
- [39] *UIT-R SM 332-4 Selectividad de los receptores*, U. I. d. Telecomunicaciones, 1978.

- [40] *Reglamento de Radiocomunicaciones*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2016. [Online]. Available: <https://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/1.43.48.es.301.pdf>
- [41] Universidad de Cantabria, *Capítulo 8. Ruido*, pp. 255-278. [Online]. Available: https://personales.unican.es/perezvr/pdf/ch8st_web.pdf.
- [42] *Compartición entre el servicio de radiodifusión y los servicios fijo y/o móvil en las bandas de ondas métricas y decimétricas-Recomendación UIT-R SM.851-1*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1993. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.851-1-199304-I!!PDF-S.pdf
- [43] K. A. D. A. Luis Carlos Gutiérrez Chirán, "Análisis del aislamiento mínimo requerido entre fuentes de radiofrecuencia en función de la separación en frecuencia y distancia por aplicación de métodos analíticos para sistemas de comunicaciones operando en VHF y UHF hasta 466 MHz,," Universidad del Cauca,, 2022.
- [44] QGIS. "Análisis Espacial (Interpolación)." https://docs.qgis.org/2.14/es/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html (accessed).
- [45] *Comparación de las metodologías cascada y ágil para el aumento de la productividad en el desarrollo de software*, S. L. C. C. Fabián González González, Diego Fernando Loaiza Buitrago, 2019. [Online]. Available: <https://repository.usc.edu.co/bitstream/handle/20.500.12421/1208/COMPARACION%20DE%20LAS%20METODOLOGIAS%20CCAS.pdf>
- [46] Baofeng, "Manual de Instrucciones de Baofeng UV-5R," ed, 2021.
- [47] GNU-Radio. "What is GNU Radio?" <https://www.gnuradio.org/about/> (accessed).
- [48] s.-r. c. Ltd. "SDR console." <https://www.sdr-radio.com/console> (accessed).
- [49] Mathworks.com. "Visión General,," <https://la.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed).
- [50] *Land Mobile Service; Radio equipment with an internal or external RF connector intended primarily for analogue speech; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU*, Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones, 2016.
- [51] Leon W. Couch II, *Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos*.
- [52] M. C. d. V. Cecilia Andrea Morras, "Sistema de medición de campo lejano,," Universidad Nacional de la Plata,.
- [53] Alcaldía de la ciudad de Popayán. "Nuestra geografía,," (accessed).

ANEXO A

- **VALORES DE POTENCIA E INTENSIDAD DE CAMPO MEDIDOS EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE TRANSMISIÓN Y POTENCIA PROMEDIO DE ANÁLISIS EXPERIMENTAL.**

En las siguientes tablas se plasman por trayectoria, frecuencia y hora de medición valores potencia e intensidad de campo de llegada al receptor:

Tabla. Mediciones de trayectoria de análisis 1: Bomba Coconuco.

HORA (24h)	Niveles de intensidad de campo (dB μ V) medidos en zona 1 con Ptx inicial = 4 W				Niveles de potencia (dBm) medidos en zona 1 con Ptx inicial = 4 W			
	137 MHz	162 MHz	450 MHz	456 MHz	137 MHz	162 MHz	450 MHz	456 MHz
9:00	20,1	14,3	N	N	-85,4	-90	N	N
10:00	18,1	13,9	N	N	-87,4	-88,2	N	N
11:00	18,4	14,4	N	N	-85,1	-87,9	N	N
12:00	17,2	14,5	N	N	-85,1	-89,2	N	N
14:00	21,6	14,4	N	N	-87	-88,1	N	N
16:00	18,1	14,7	N	N	-88,6	-88,3	N	N
18:00	18,9	13,8	N	N	-85	-88,5	N	N

Tabla. Mediciones de trayectoria de análisis 2: La Intersección.

HORA (24 h)	Niveles de intensidad de campo (dB μ V) medidos en zona 2 con Ptx inicial = 4 W				Niveles de potencia (dBm) medidos en zona 2 con Ptx inicial = 4 W			
	137 MHz	162 MHz	450 MHz	456 MHz	137 MHz	162 MHz	450 MHz	456 MHz
9:00	25,2	38,7	30	33,8	-80,5	-70	-81	-73
10:00	26	37,7	29,7	33,4	-78,9	-69,3	-82,2	-73,5
11:00	25,5	37,7	28,3	34,1	-81,1	-70,2	-81,4	-74
12:00	25,3	38,1	27,4	33,6	-81,5	-68,9	-83	-73,5
14:00	25,7	37,2	27,7	34,4	-82	-69,4	-81,9	-73,5
16:00	21,9	39,7	28	34,3	-80,9	-70,4	-81,3	-74
18:00	26	37,4	29	33,8	-78,9	-70,1	-81,1	-72,9

Tabla. Mediciones de trayectoria de análisis 3: El Tránsito.

HORA (24 h)	Niveles de intensidad de campo (dB μ V) medidos en zona 3 con Ptx inicial = 4 W				Niveles de potencia (dBm) medidos en zona 3 con Ptx inicial = 4 W			
	137 MHz	162 MHz	450 MHz	456 MHz	137 MHz	162 MHz	450 MHz	456 MHz
9:00	29,4	31,7	40,2	38,5	-74,8	-75,3	-67	-70
10:00	28,9	33,1	40,2	39	-75,7	-76,5	-68,3	-70,1
11:00	30	30,9	38,3	39,1	-76	-76,4	-67,6	-71,2
12:00	29,3	32,5	40,1	38,8	-75,1	-75,7	-66	-70,7
14:00	28,7	34	41,6	38,3	-74,4	-74,9	-66,5	-69
16:00	28,7	32,3	41	38,2	-75,1	-75,1	-67	-70,2
18:00	29,1	31,5	40,5	39,7	-75,1	-75,2	-67,3	-70

Tabla. Mediciones de trayectoria de análisis 4: Gran Colombia.

HORA (24 h)	Niveles de intensidad de campo (dB μ V) medidos en zona 4 con Ptx inicial = 4 W				Niveles de potencia (dBm) medidos en zona 4 con Ptx inicial = 4 W			
	137 MHz	162 MHz	450 MHz	456 MHz	137 MHz	162 MHz	450 MHz	456 MHz
9:00	45	47,6	30,3	34	-60,7	-58,2	-78,5	-77
10:00	46,4	47,4	30,1	33,1	-60,8	-58,9	-79	-75,4
11:00	46,5	47,2	30,5	32	-60,2	-58,9	-78,5	-75,5
12:00	46,3	47	30,6	32,4	-60,8	-59	-77,9	-75,1
14:00	46,1	47,1	31,3	33	-60,9	-58,9	-79,1	-75,5
16:00	46,7	47,1	31,5	33,5	-60,5	-59	-78,2	-75
18:00	46,2	47,4	30,7	34	-60,1	-59,4	-78,2	-76

Tabla. Mediciones de trayectoria de análisis 5: El Cubo.

HORA (24 h)	Niveles de intensidad de campo (dBμV) medidos en zona 5 con Ptx inicial = 4 W				Niveles de potencia (dBm) medidos en zona 5 con Ptx inicial = 4 W			
	137 MHz	162 MHz	450 MHz	456 MHz	137 MHz	162 MHz	450 MHz	456 MHz
9:00	21,5	25,4	17	13,4	-85	-83,9	-87,4	-94,3
10:00	22	25,8	16,1	13,4	-86,1	-84,6	-88,2	-95
11:00	21,7	24,9	17,7	14,3	-86,7	-84,3	-88,2	-93
12:00	21,6	26,5	16,3	13,4	-86	-85,7	-86,1	-95,3
14:00	21,2	25,5	16,1	14	-87	-83,2	-86,8	-93,6
16:00	21,8	26,4	17	12	-85,9	-83,1	-87	-93,5
18:00	21,1	24,9	16,1	13,4	-85,9	-85,3	-88,7	-94,8

Tabla. Mediciones de trayectoria de análisis 6: Moscopán.

HORA (24 h)	Niveles de intensidad de campo (dBμV) medidos en zona 6 con Ptx inicial = 4 W				Niveles de potencia (dBm) medidos en zona 6 con Ptx inicial = 4 W			
	137 MHz	162 MHz	450 MHz	456 MHz	137 MHz	162 MHz	450 MHz	456 MHz
9:00	25,5	23	7,8	7,3	-82,2	-83,1	-99	-99,2
10:00	24,5	22,9	7,2	7,7	-82,8	-83,5	-98,9	-99,2
11:00	24,2	23,3	7,3	8,1	-82,2	-84	-100	-100
12:00	24,1	23,6	7,7	7,4	-82,1	-83,9	-100,4	-98
14:00	24,6	23,9	8	7,8	-81,4	-83,6	-98,4	-96,6
16:00	24,1	22,5	7,2	7,9	-82,1	-84	-98	-99,8
18:00	24,2	22,9	7,8	7,2	-81,2	-84,7	-101,4	-98,7

Para encontrar un valor que permita analizar de forma experimental la mínima separación espacial, se debe obtener un valor promedio de señal por trayectoria de análisis y frecuencia de operación, para el cálculo de los valores requeridos se utiliza la siguiente ecuación:

$$Potencia\ promedio = \frac{\sum \text{niveles de señal medidos}}{\#de\ señales}, \quad (1)$$

Los valores medidos brindaron los siguientes resultados:

Tabla. Valor promedio de potencia de recepción por trayectoria de análisis

Frecuencia (MHz)	Bomba Coconuco (dBm)	La Intersección (dBm)	El Tránsito (dBm)	Gran Colombia (dBm)	El Cubo (dBm)	Moscopan (dBm)
137	-86,2	-80,5	-75,2	-60,6	-86,1	-82
162	-88,6	-69,7	-75,6	-58,9	-84,3	-83,8
450	----- ¹⁰	-81,7	-67,1	-78,4	-87,4	-99,4
456	-----	-74,5	-70,1	-75,6	-94,2	-98,8

¹⁰ La trayectoria estudiada no presenta valores de señal que superen los valores mínimos de sensibilidad para la frecuencia a analizar.