



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“MEDICIÓN ESPECTRAL Y ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE  
CANALES EN LA BANDA FM (88.3-107.3 MHZ) Y MODELAMIENTO  
ESTADÍSTICO PARA EL POSIBLE USO DE DISPOSITIVOS CON ACCESO  
OPORTUNISTA AL ESPECTRO EN UN EDIFICIO EN EL CENTRO DE LA  
CIUDAD DE GUAYAQUIL”

### **INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR**

Previo a la obtención del Título de:

### **INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

JORGE ALBERTO AVILÉS ZAVALA

MARÍA JOSÉ RAMÍREZ PRADO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2015

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestros más infinitos agradecimientos a Nuestro Padre Celestial quien nos da la fortaleza para seguir nuestros sueños y nos cuida con su manto lleno de amor cada día de nuestras vidas, y a nuestros padres quienes con tanto esfuerzo nos han enseñado a ser mejores cada día. A cada uno de los docentes de ESPOLE que aportaron con sus conocimientos a nuestra formación profesional.

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a Dios quien me ha dado la fortaleza necesaria para superar grandes dificultades en mi vida manteniéndose a mi lado. A mis padres, Jorge Avilés Y Maricel Zavala, quienes día a día con amor construyeron mi vida y sin los cuales me sería imposible estar donde estoy. A todas aquellas personas que de una u otra manera han aportado con experiencia, conocimiento por las cuales no sería quien soy.

**Jorge Alberto Avilés Zavala**

Le dedico este proyecto a Dios por iluminarme cada uno de mis días. A mi madre María Soledad por su amor, su entrega incondicional y por su ejemplo que me ha demostrado que todo es posible con Dios en nuestro corazón. A los docentes, quienes en todo mi transcurso educativo han podido brindarme sus conocimientos y contribuir con mi formación profesional. Finalmente a mis amigos por apoyarme.

**María José Ramírez Prado**

## TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....  
**Ph.D. Francisco Novillo**

PROFESOR EVALUADOR

.....  
**Mag. Washington Medina**

PROFESOR EVALUADOR

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos mi nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

---

Jorge Alberto Avilés Zavala

---

María José Ramírez Prado

## RESUMEN

El espectro electromagnético ha sido saturado debido a la asignación de varias tecnologías de comunicación como es el caso de canales FM, este problema afecta al rendimiento de la comunicación y a la velocidad de transmisión. La solución para la saturación del espectro es aprovechar al máximo cada uno de los canales del mismo, proceso denominado Acceso al Espectro de manera Oportunista (OSA), que permitirá el uso del espectro de una banda licenciada sin afectar la comunicación que se da en el mismo, aliviando la carga del rango de espectro radioeléctrico sobrecargado. Así mismo, se aprovecha el uso del espectro de manera más eficaz.

Para ello en una edificación de 12 pisos se va a realizar un análisis espectral por 4 días en cada piso definidos en planta baja, 6to piso, 10mo piso y planta alta. El análisis espectral consistirá en la medición de la potencia de la banda FM, que van desde 88 MHz hasta 108 MHz, y se definirá la sensibilidad de recepción de FM; en caso que sobrepase el mismo se determinará si el canal está disponible, no disponible o temporalmente disponible [22].

Al final se modelará estadísticamente los datos tomados y se verificará el comportamiento estadístico del mismo.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN .....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA .....	v
RESUMEN .....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
CAPÍTULO 1 .....	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Descripción del problema .....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general .....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.3.3 Justificación .....	4
1.4 Metodología.....	5
1.5 Alcance.....	6
CAPÍTULO 2.....	10
2. ESTADO DEL ARTE .....	10
2.1 Espectro Radioeléctrico.....	11
2.1.1 Clasificación del Espectro Radioeléctrico .....	11
2.1.2 División del Mundo .....	12
2.1.3 Atribución de bandas de frecuencias.....	14
2.1.4 Distribución y clases de los canales FM.....	14
2.1.5 Marco regulatorio de las telecomunicaciones en el Ecuador	18
2.2 La radiodifusión FM en la actualidad .....	20
2.3 Modulación FM.....	20
2.4 Demodulación FM .....	22

2.5	Transmisión FM.....	22
2.5.1	Los transmisores .....	23
2.5.2	Amplificadores .....	24
2.5.3	Fuente de poder .....	25
2.5.4	Filtros.....	26
2.5.5	La antena.....	27
2.5.6	Propagación .....	28
2.6	Recepción de FM .....	29
2.7	Uso del espectro radioeléctrico en FM .....	30
2.7.1	Mala distribución de canales .....	30
2.8	Acceso dinámico al espectro .....	31
2.8.1	Modelo dinámico exclusivo.....	32
2.8.2	Modelo compartido abierto .....	34
2.8.3	Acceso jerárquico .....	34
2.9	Radio cognitiva .....	36
2.10	Espacios en blanco .....	37
2.11	Acceso oportunista al espectro (OSA) .....	38
2.12	Detección del espectro.....	39
	CAPÍTULO 3.....	43
3.	DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO DE ESTUDIO.....	43
3.1	Metodología.....	44
3.2	Modelamiento.....	47
	CAPÍTULO 4.....	50
4.1	Descripción del escenario de estudio .....	50
4.2	Funciones estadísticas .....	53
4.1	Gráficos de potencias.....	59
4.2	Gráficos de disponibilidad.....	62
4.3	Disponibilidad de banda por piso.....	79
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	81

BIBLIOGRAFÍA.....	84
ANEXOS.....	88

# CAPÍTULO 1

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 1.1 Antecedentes

El espectro electromagnético es un recurso natural renovable pero bien limitado en su uso y una de las problemáticas actuales es que no está eficientemente utilizado como en el caso de México y sus emisoras de radio FM que actualmente están separadas cada 800 KHz y que tranquilamente pueden operar sin interferencia con una separación menor [1].

Con el paso del tiempo y con el avance tecnológico se desarrollan formas de comunicación más avanzadas y número de equipos que requieren el acceso a datos vía internet; este hecho preocupante ha dado a lugar a muchas investigaciones alrededor del mundo, como en mayo del 2012 Beijing realizo estudios en la banda que va desde los 440 MHz hasta los 2700 MHz que demostraron que el uso real del mismo es solamente del 15.2% [2].

Además se encuentran tecnologías de comunicación con usuarios que ocupan el mismo canal de transmisión y/o recepción de datos, por lo que lleva a la saturación de los mismos. En el Ecuador existen varias tecnologías como WIFI, 3Gy 4G, las mismas que no están efectivamente desarrolladas impidiendo la adaptación de la nueva tecnología celular 5G [3][4][5].

Ecuador con el fin de dar un buen servicio de telecomunicaciones no renovó la concesión en la banda de 2.4 GHz a la empresa UNIVISA, la que ofertaba el servicio de televisión pagada de forma inalámbrica mediante el Servicio de Distribución Multipunto por microondas (MMDS), con el fin usar esta banda en el servicio de telecomunicaciones móvil 4G que brindan las operadoras en el país. Actualmente, UNIVISA brinda televisión por satélite con el fin de no perder la cantidad de personas que estaban suscritas a este servicio [5].

La radiodifusión FM es una de las formas de comunicación más populares y extendidas en el Ecuador; inició hace más de 50 años, su espectro va desde los 88 MHz hasta 108 MHz con canales de 200 KHz con un total de 100 canales FM.

Para evitar interferencias de canal se ha comprobado que es recomendable que las emisoras en una misma región deben ser asignadas con una separación de 400 KHz entre ellas [6][22].

La radiodifusión FM es modulada en frecuencia, su recepción es mucho mejor que la emisión AM que es modulada en amplitud, ya que tiene una menor vulnerabilidad al ruido.

Para efectuar una comunicación de radiodifusión FM se utilizan antenas tipo Parabólica o Yagi para que los niveles de ruido e interferencia disminuyan, además para este tipo de enlace debe existir línea de vista y tener la misma polarización [7].

## **1.2 Descripción del problema**

Las emisiones de señales FM sufren de intermodulación que es un problema que lleva varios años afectando este tipo de transmisiones, esto debido a la cantidad de emisoras que salen al aire y el mal diseño de sus respectivas antenas transmisoras.

La intermodulación es la unión de dos señales fijas o armónicas, que generan una señal diferente de la frecuencia central de las dos primeras, convirtiéndola en una señal no deseada para la recepción [8].

Debido a que en el Ecuador el proceso de digitalización de las emisiones FM no se lleva a cabo aún, las emisiones FM analógicas consumen la banda licenciada con muy baja eficiencia.

Además, la radiocomunicación FM está prácticamente asignada en un 100%, este hecho impide utilizar este tipo de canales en zonas donde la cobertura no alcanza y donde se requiere más canales de comunicación para evitar interferencias y bajos servicios de comunicación.

El espectro radioeléctrico está dividido en bandas de uso libre, bandas de uso oficial y uso regulado. La radiodifusión FM se encuentra en la banda de uso regulado y por ende debe ser asignada una concesión, las frecuencias asignadas

con concesión deben pagar una tasa con el fin de mantener los servicios de administración, vigilancia y chequeo del espectro radioeléctrico. La concesión de un espectro radioeléctrico “banda” es considerado un bien privado, talque los titulares son responsables de uso del mismo en base a las leyes y normas impuestas en la concesión [9].

El uso eficiente del espectro electromagnético en un edificio es de suma importancia debido a que existen una gran cantidad de pérdida de la señal entre el transmisor y el receptor al pasar por pisos y paredes de un típico edificio de oficina; esta pérdida es aproximadamente de 12.5db en bandas que están aproximadamente por los 914 MHz, es decir, mientras exista mayor cantidad de pisos en un edificio la señal se irá deteriorando más al llegar a los pisos bajos. Esta pérdida depende también de la frecuencia en la que se esté transmitiendo [10].

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

- Analizar la disponibilidad temporal de canales en la banda FM de una edificación en la ciudad de Guayaquil y modelar estadísticamente la disponibilidad de los mismos para un posible caso de acceso oportunista al espectro usando así de manera más eficiente todos los canales.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Investigar sobre un sistema OSA (tendencias de nuevas tecnologías).
- Medir los niveles de potencia de la banda de los canales de radiodifusión FM en el Ecuador.
- Análisis de la disponibilidad de cada canal de la banda FM durante una semana.

- Modelar cada canal FM de acuerdo a un modelo matemático estadístico para conocer su comportamiento en el tiempo en edificio de acuerdo a la posición geográfica en Guayaquil.
- Determinar la probabilidad de acceso oportuno a una banda licenciada dentro de las frecuencias asignadas en Guayaquil desde 88.3 MHz hasta 107.3 MHz.
- Comprobación del modelo estadístico de los canales.

### 1.3.3 Justificación

Con el crecimiento de dispositivos de comunicación inalámbrica y la necesidad de tasas de datos de los mismos existe cada vez menor cantidad de espectro disponible y con las investigaciones que se han realizado se demuestra que actualmente no existe un uso eficiente del mismo.

Poder analizar el comportamiento de uso del espectro y desarrollar modelos estadísticos del mismo es de mucha importancia para ver la factibilidad de que se puedan desarrollar dispositivos con acceso oportunista sin afectar o interferir con los usuarios primarios que estén en uso del espectro licenciado de la banda FM.

La interferencia entre usuarios en tecnologías tipo WIFI disminuiría abismalmente en zonas con mínimo alcance de señal de banda licenciada (por debajo del umbral de sensibilidad mínimo) o incluso periodos de tiempo donde el usuario primario de la banda no transmita, usuarios secundarios podrán transmitir haciendo uso oportunista del espectro limitando la interferencia a los usuarios principales. Este mercado es de mucho interés para organizaciones debido a que asignar bandas de acceso oportunista puede ser un segundo mercado de venta y regulación permitiendo el desarrollo rápido de esta tecnología [11].

## 1.4 Metodología

Hay varias formas de analizar la disponibilidad de canales y una de ellas es con la medición de la potencia por cada canal del espectro, para esto se va a utilizar un dispositivo llamado DVB-T+DAB+FM que tiene un rango de análisis desde 24 MHz hasta 1766 MHz e intervalos de captura de 250 KHz hasta los 3 MHz, esta herramienta cumple con los rangos de captura de FM debido a que esta banda va desde los 88 MHz hasta los 108 MHz, con ayuda del software MATLAB se va a realizar una programación donde se va a configurar los parámetros del dispositivo para que realice capturas de canales de 2.8 MHz de ancho de banda al cual se divide en 14 canales respectivamente para tener los 200 KHz deseados, de estos canales analizados se obtendrá un máximo de potencia por muestra. Las mediciones se realizarán durante el transcurso de una semana y se irán guardando en un archivo con la extensión .mat.

Se compara la potencia máxima obtenida en el canal con la sensibilidad de recepción de un dispositivo comercial FM, este valor es fijo de -90dbm; si sobrepasa la sensibilidad de recepción nos dará la información de que el canal se encuentra ocupado, para esto se le da el valor de 1, caso contrario estará disponible y se le dará el valor de 0. Con los datos de cada canal de la banda FM se forman grupos de 13, se le saca el promedio y estos datos se agruparan en una nueva matriz con la finalidad de analizar la disponibilidad de los canales [12].

Con estos nuevos datos de cada canal se los modelará estadísticamente con tres funciones que serán las que más se asemejen en su comportamiento en el tiempo.

Una vez modeladas, con estas funciones se utilizará bondad de ajuste para corroborar la semejanza de la distribución de los datos con respecto al modelo estadístico seleccionado.

Por último se verá la factibilidad del uso de la banda FM para el acceso oportunista de dispositivos.

## 1.5 Alcance

Realizar las mediciones en la banda FM de los canales que van desde 88.3 MHz hasta 107.3 MHz dentro de un edificio de 12 pisos céntrico en la ciudad de Guayaquil en planta baja, quinto piso y planta alta durante 1 semana por cada piso de forma continua.

Las mediciones se realizarán con el dispositivo USB-T+DAB+FM en el rango anteriormente especificado con anchos de banda de canal de 2.8 MHz por cuestiones de parámetros que acepta el dispositivo, que con programación se procederá a separar los mismos en 5 canales de 200 KHz respectivamente para cumplir con las especificaciones de captura de cada uno de los canales.

Los softwares que se utilizarán para la programación serán Matlab, que nos ayudará con la captura y manejo de los datos, y Easyfit que nos facilitará el modelamiento estadístico, los datos se los aproximara únicamente a tres modelos que serán los que más se aproximen.

El edificio donde se realizarán las mediciones se encuentra en el Condominio Pegar, ubicado en el centro de la ciudad de Guayaquil. Las emisoras que están asignadas en la ciudad están separadas cada 400 KHz.

El nombre de las estaciones de radio FM con su respectiva frecuencia de transmisión en la ciudad de Guayaquil se detalla en la Tabla 1.

<b>FRECUENCIA</b>	<b>NOMBRE DE EMISORA</b>	<b>UBICACIÓN</b>
<b>88.1</b>	Radio María	Cerro Azul
<b>88.5</b>	Galaxia FM	Cerro Azul
<b>88.9</b>	Diblu	Cerro del Carmen
<b>89.3</b>	Radio City	Cerro Azul

Tabla 1: Estaciones de radio FM en la ciudad de Guayaquil

<b>FRECUENCIA CENTRAL</b>	<b>NOMBRE DE EMISORA</b>	<b>UBICACIÓN</b>
<b>89.7</b>	Radio Punto Rojo	Cerro Azul
<b>90.1</b>	Radio Romance	Cerro Azul
<b>90.5</b>	Canela Radio	Cerro Azul
<b>90.9</b>		
<b>91.3</b>	Radio Tropicana	Cerro Azul
<b>91.7</b>	Radio Antena 3	Cerro Azul
<b>92.1</b>	Radio Estrella	Cerro Azul
<b>92.5</b>	Forever Radio	Cerro Azul
<b>92.9</b>	Radio Armónica	Cerro Azul
<b>93.3</b>	Majestad FM	Cerro Carmen
<b>93.7</b>	Radio Disney	Cerro Azul
<b>94.1</b>	Radio Onda Positiva	Cerro Azul
<b>94.5</b>	Radio Platinum	Cerro Azul
<b>94.9</b>	La Otra FM	Cerro Carmen
<b>95.3</b>	Cupido FM	Cerro Azul
<b>95.7</b>	Radio Metro Estéreo	Cerro Azul
<b>96.1</b>	Radio Onda Cero	Cerro Azul
<b>96.5</b>	Radio Tropicana	Cerro Azul
<b>96.9</b>	Mas Candela	Cerro Carmen

Tabla 2: Estaciones de radio FM en la ciudad de Guayaquil

<b>FRECUENCIA CENTRAL</b>	<b>NOMBRE DE EMISORA</b>	<b>UBICACIÓN</b>
<b>97.3</b>	Radio Nuevo Tiempo	Cerro Azul
<b>97.7</b>		
<b>98.1</b>	Radio Morena	Cerro Azul
<b>98.5</b>	JC Radio	Cerro Azul
<b>98.9</b>	Radio I99	Cerro Azul
<b>99.3</b>	Radio Sabor Mix	Cerro Azul
<b>99.7</b>	Radio Elite	Cerro Azul
<b>100.1</b>	La Prensa Sport	Cerro Azul
<b>100.5</b>	RSN FM	Cerro Carmen
<b>100.9</b>	Radio Asamblea Nacional	Cerro Azul
<b>101.3</b>	Radio Centro	Cerro Azul
<b>101.7</b>	Radio Caravana	Cerro Carmen
<b>102.1</b>	WQ Radio	Cerro Azul
<b>102.5</b>	HCJB La voz de los Andes	Cerro Carmen
<b>102.9</b>	Radio Sucre	Cerro Azul
<b>103.3</b>	Joya Estéreo	Cerro Azul
<b>103.7</b>	Sonorama	Cerro Azul
<b>104.1</b>	Alfa Radio	Cerro Azul

Tabla 3: Estaciones de radio FM en la ciudad de Guayaquil

<b>FRECUENCIA</b>	<b>NOMBRE DE EMISORA</b>	<b>UBICACIÓN</b>
<b>CENTRAL</b>		
<b>104.9</b>	Radio 11Q	Cerro Azul
<b>105.3</b>	Radio Publica	Cerro Azul
<b>105.7</b>	Radio Fabu	Cerro Azul
<b>106.1</b>	BBN Radio	Cerro Azul
<b>106.5</b>	Hot 106 Radio Fuego	Cerro Azul
<b>106.9</b>	Radio Francisco Estéreo	Cerro Azul
<b>107.3</b>	Radio Visión	Cerro Azul

Tabla 4: Estaciones de radio FM en la ciudad de Guayaquil

## CAPÍTULO 2

### 2. ESTADO DEL ARTE

Los sistemas de telecomunicaciones son instrumentos de gran importancia en un país para su desarrollo y ayuda a la mejora de la calidad de vida de cada una de las personas, comunidades y pueblos ya que ayuda a intercambiar, usar, buscar y distribuir información.

Como se ha visto a través del paso del tiempo, la tecnología en telecomunicaciones avanza de forma abismal, tantas tecnologías que aparecen como 4G y otras que se desvanecen como el telégrafo que fue la primera forma de comunicación eléctrica. Cada vez el servicio de telecomunicaciones debe ser más eficiente y cumplir con todos los requerimientos de los usuarios [13].

Así mismo, con el aumento de servicios de telecomunicaciones, con las demandas de calidad de servicio y la cantidad de equipos receptores que actualmente son en mayor cantidad que las mismas personas que habitan el planeta. El espectro radioeléctrico es bien requerido por operadoras o empresas que se encargan de brindar los distintos tipos de servicios de telecomunicaciones inalámbricos.

El uso espectral ineficiente ha llevado a varios estudios científicos para crear modernos sistemas de comunicación inalámbrica que puedan mejorar el uso del mismo y que nuevas tecnologías como 5G no tengan problemas de escases de frecuencia [8][2].

El OSA es una de las soluciones más factibles que se han planteado; se fundamenta en la radio cognitiva, donde el usuario sin concesión puedan acceder a un espectro licenciado de manera jerárquica con la única condición de que no se afecte a los usuarios primarios que son quienes si tienen la concesión.

La radio es un medio de comunicación masivo debido a que llega al oyente de manera personal y tiene una gran cobertura que nos mantienen a todo momento recibiendo información de cualquier índole. Envía señales de audio que son moduladas en frecuencia y son propagadas en formas de ondas

electromagnéticas y estas son transmitidas por un medio que es el aire a través de antenas que se encuentran en una estación base.

En 1906 Reginald Aubrey Fessenden envió la primera emisión de señales de audio de la historia y hasta 1933 Edwin Armstrong descubre una forma de radiodifusión que es menor sensible al ruido usando la modulación de frecuencia que actualmente se conoce como radio FM. En el Ecuador la primera transmisión sonora de prueba fue en 1925 por el Ingeniero Carlos Cordovez Borja y cuatro años más tarde apareció la primera estación de radio llamada “Radio Estadio El Prado” en la ciudad de Riobamba [14][15].

## **2.1 Espectro radioeléctrico**

El espectro radioeléctrico está definido como un grupo de ondas electromagnéticas que se esparcen por un medio ya sea aire o agua sin ningún tipo de guía físico como cable coaxial, hilo de cobre, fibra, etc [16].

El espectro es actualmente utilizado por compañías que prestan servicios de telecomunicaciones, radiodifusión, ya sea FM, AM o televisión, educación, seguridad, transporte, investigaciones y muchas aplicaciones más.

### **2.1.1 Clasificación del espectro radioeléctrico**

Se clasifica al espectro con la finalidad de tener un mejor estudio de las características generales de los varios grupos de frecuencia y a la vez poder separar los usos que se le dan a cada uno de los mismos. La radiodifusión FM se encuentra dentro del rango de Frecuencia Ultra Alta (UHF), ya que va desde los 88 MHz hasta 108 MHz [6][22].

En el Ecuador se lo clasifica en distintos grupos que tiene relación con las recomendaciones del reglamento mundial de las radiocomunicaciones (UIT-R), a quienes se rigen todos los países miembros que pertenecen a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) que es el organismo máximo de administración y control mundial de las telecomunicaciones [16].

La clasificación del espectro radioeléctrico se la especifica en la Tabla 2.

# de la banda	Símbolos	Gama de frecuencias	Subdivisión métrica correspondiente
4	VLF	3 a 30 KHz	Ondas miriamétricas
5	LF	30 a 300 KHz	Ondas kilométricas
6	MF	300 a 3000KHz	Ondas hectométricas
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas
9	UHF	300 a 3000 MHz	Ondas decimétricas
10	SHF	3 a 30 Ghz	Ondas centimétricas
11	EHF	30 a 300 Ghz	Ondas milimétricas

Tabla 5. Clasificación del espectro radioeléctrico

### 2.1.2 División del mundo

La UIT-R es la encargada de dividir al mundo en tres regiones para poder administrar y llevar un control de la atribución de las frecuencias a nivel mundial, esta división se ha hecho a partir de varios estudios e investigaciones acerca de los problemas que tienen las ondas electromagnéticas al ser propagadas. Cada región posee una atribución de bandas diferentes y se las clasifica de la siguiente manera:

- **Región 1**

África, Europa, el Medio Oriente al este del Golfo Pérsico incluyendo a Iraq, Mongolia y la antigua Unión Soviética. Definidas entre las líneas A y B [17].

- **Región 2**

Continente de América, Groenlandia y algunas de las islas y archipiélagos del Pacífico. Definidas entre las líneas B y C [17].

- **Región 3**

Limitada por la línea C y A, excepto Armenia, Azerbaiyán, Federación de Rusia, Georgia, Kazajstán, Mongolia, Uzbekistán, Kirguistán, Tayikistán, Turkmenistán, Turquía, Ucrania, la zona norte de la Federación de Rusia y la parte de Irán situada fuera de estos límites [17].

- **Línea A**

Es una línea imaginaria que comienza en el Polo Norte por el meridiano de 40° al Este de Greenwich hasta el paralelo 40° Norte, donde hace un recorrido de arco de círculo máximo hasta el punto de intersección del meridiano de 60° al Este con el Trópico de Cáncer, y, finalmente, por el meridiano 60° Este hasta el Polo Sur [17].

- **Línea B**

Es una línea imaginaria que comienza en el Polo Norte por el meridiano de 10° Oeste hasta su cruce con el paralelo 72° Norte. Desde ese punto hace un recorrido un recorrido de arco de círculo máximo hasta el cruce del meridiano 50° Oeste con el paralelo 40° Norte. Luego, sigue otro arco de círculo máximo hasta la intersección del paralelo 10° Sur con el meridiano 20° Oeste, desde donde continúa hasta el Polo Sur por este meridiano [17].

- **Línea C**

Parte del Polo Norte por el meridiano 170° Oeste, sigue un arco de círculo máximo hasta el cruce del paralelo 65° 30' Norte con el límite internacional en el estrecho de Bering; continúa por otro arco de círculo máximo hasta la intersección del meridiano 165° Este

con el paralelo 50° Norte; sigue de nuevo un arco de círculo máximo hasta el cruce del meridiano 170° Oeste con el paralelo 10° Norte; prosigue por el paralelo 10° Norte hasta su intersección con el meridiano 120° Oeste, y, finalmente, sigue por este meridiano hasta llegar al Polo Sur [17].

Haciendo un análisis de la división del mundo en las diferentes regiones Ecuador se encuentra en la región dos, por lo que se debe regir a la atribución que hay en esa zona [17].

### 2.1.3 Atribución de bandas de frecuencias

Los rangos de frecuencias están asignados de acuerdo a la región a la que se pertenece.

En la tabla 6 se puede analizar la distribución de radiodifusión para las tres regiones:

Asignación de bandas de frecuencia para radiodifusión		
Región 1	Región 2	Región 3
	76 MHz – 88 MHz	
	Compartida con fijo y móvil	
87.5 MHz - 100MHz	88 MHz – 100 MHz	87 MHz – 100 MHz
	100 MHz -108 MHz	

Tabla 6: Asignación de bandas por regiones de radiodifusión [17]

### 2.1.4 Distribución y clases de los canales FM

De acuerdo al área de cobertura y a ciertos parámetros técnicos de operación se clasifican en Clase A y Clase B [18]

### Canales FM Clase A

Las estaciones que están dentro de este grupo de canales están estructuradas de tal manera que dan cobertura a pequeñas localidades y pueblos adyacentes. La máxima altura permitida de la antena transmisora es de 75 m sobre la tierra y puede alcanzar hasta una potencia de 1 KW [18].

En la tabla 7 se encuentra las frecuencias portadoras y el número del canal al que pertenece cada una de ellas.

Frecuencia (MHz)	# de Canal
92.1	221
92.7	224
93.5	228
94.3	232
95.3	237
95.9	240
96.7	244
97.7	249
98.3	252
99.3	257
100.1	261
100.9	265
101.7	269

Tabla 7: Estaciones FM y Canales de Clase A

<b>Frecuencia (MHz)</b>	<b># de Canal</b>
102.3	272
103.1	276
103.9	280
104.9	285
105.5	288
106.3	292
107.1	296

Tabla 8: Estaciones FM y canales de Clase A

### **Canales FM Clase B**

Las estaciones que se encuentran dentro de esta división están estructuradas de tal manera que tengan la posibilidad de dar coberturas a áreas metropolitanas o a grandes ciudades y alrededores, la potencia que se podría llegar a operar es de 20 Kw de radiación efectiva con una altura de la antena máxima de 150 metros sobre la tierra [18].

En la tabla 8 se especifica cuáles son las frecuencias FM de este tipo y el número de canal al que pertenece.

<b>Frecuencia (MHz)</b>	<b># de Canal</b>
<b>92.3</b>	222
<b>92.5</b>	223
<b>92.9</b>	225
<b>93.1</b>	226
<b>93.3</b>	227

Tabla 9: Estaciones y canales Clase B

<b>Frecuencia (MHz)</b>	<b># de Canal</b>
93.7	229
93.9	230
94.1	231
94.5	233
94.7	234
94.9	235
95.1	236
95.5	238
95.7	239
96.1	241
96.3	242
96.5	243
96.9	245
97.1	246
97.3	247
97.5	248
97.9	250
98.1	251
98.5	253
98.7	254
98.9	255

Tabla 10: Estaciones y canales Clase B

<b>Frecuencia (MHz)</b>	<b># de Canal</b>
<b>99.1</b>	256
<b>99.5</b>	258
<b>99.7</b>	259
<b>99.9</b>	260
<b>100.3</b>	262
<b>100.5</b>	263
<b>100.7</b>	264
<b>101.1</b>	266
<b>101.3</b>	267
<b>101.5</b>	268
<b>101.9</b>	270
<b>102.1</b>	271
<b>102.5</b>	273
<b>102.7</b>	274
<b>102.9</b>	275
<b>103.3</b>	277

Tabla 10: Estaciones y canales Clase B

### 2.1.5 Marco regulatorio de las telecomunicaciones en el Ecuador

En los países del mundo existe un ente regulador y otro controlador o un grupo que se encargue de ambas funciones, el ente regulador se encarga de la asignación del espectro y de aprobar las leyes que se deben cumplir en este campo mientras que el controlador se encarga de verificar que todas las leyes dispuestas se cumplan y que todo esté normalizado para

que haya una competencia justa entre empresas proveedoras de telecomunicaciones. En caso de Ecuador es así porque el estado es el que administra, regula y controla todos los sectores estratégicos y el espectro radioeléctrico, según la constitución está, considerado como un sector estratégico [31].

La radiodifusión es un sistema que usa espectro licenciado, en el caso de México el departamento encargado de esto es la Dirección General de Radio Televisión y Cinematografía de la Secretaría de Gobernación, este país cuenta con 479 emisoras en FM entre ellas 380 con concesión y 99 con permiso. Además las estaciones de radiodifusión FM que son comerciales requieren permisos de concesión de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte, mientras que las emisoras que son culturales, de educación sin fines de lucro sólo necesitan el permiso de la secretaría [19].

El organismo encargado de la regulación y el control en el Ecuador es la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) y de la administración las telecomunicaciones es el Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información (MINTEL).

Las organizaciones estatales que regulan, controlan y administran las telecomunicaciones son las encargadas de establecer las normas jurídicas y de hacerlas cumplir; una de esas normas establecidas actuales evita que bandas licenciadas puedan ser usadas por usuarios no licenciados, siendo no tan eficiente porque hay rango de espectros que se ha demostrado que no están completamente utilizados, por lo tanto hay un gran porcentaje de disponibilidad en tiempo y el espacio [2][16][19].

Además los dispositivos están configurados solo para acceder a rangos de frecuencias específicos, es por eso que cuando una nueva tecnología móvil entra al mercado es necesario que los dispositivos celulares puedan acceder a la misma.

Lo anterior se debe a que todos los equipos tanto receptores, emisores y de medida que pueden utilizarse tiene que estar de acuerdo con las recomendaciones con la UIT-R [16].

## **2.2 La radiodifusión FM en la actualidad**

La radio FM es uno de los medios masivos más antiguos con casi un siglo de su uso que representa una forma gratis de conectarse con otras personas e ideas de una comunidad y representa un emblema del pasado.

Un reciente reporte encontró que las emisiones de radio continúan siendo un producto de primer consumo en Estados Unidos con un 63% de personas que prefieren la radio tradicional donde encuentran nueva música, esto reafirma la fuerza de la radio tradicional en esta época [20].

Hablando de las personas que escuchan AM y FM, en Estados Unidos sigue siendo la misma cantidad de aproximadamente hace 10 años. De acuerdo con Pew Research Center, el 92 % de los norteamericanos de 12 años y mayores escuchan emisiones de radio al menos una vez por semana [20].

La decisión de continuar con la tecnología FM se puede observar en los carros, ya que han tenido radios FM desde hace décadas y de acuerdo a datos de Ofcom cerca de un 61.7% de los nuevos automóviles siguen con radios FM [20].

En la ciudad de Guayaquil hay 95 estaciones de radio las cuales pueden ser públicas, comunitarias o privadas, El objetivo del Estado es que estén equitativamente repartidas aunque actualmente ese no es el caso.

## **2.3 Modulación FM**

La expresión FM hace referencia a una técnica de modulación de ondas de radio, que permite enviar información mediante el uso de una onda de alta frecuencia transmitida conocida como portadora, se lo logra modificando su frecuencia instantánea proporcionalmente al cambio de la señal moduladora y la magnitud

de la amplitud de la señal transmitida será la misma que la de su portadora por lo que será constante [21].

Este tipo de modulación es menos susceptible al ruido externo y las variaciones de voltajes procedentes del espacio de propagación entre el transmisor y receptor [21][22].

Esta técnica es usualmente usada en muy alta frecuencia para transmisiones de radiodifusión de voz y sonido debido a su alta fidelidad, incluso el sonido que proviene de las ondas de las bandas de que transmiten para televisión son modulaciones en FM.

Para las comunicaciones de radio ordinaria el tiempo de modulación de FM utilizado se llama N-FM Narrow FM La comunicación de tipo W-FM requiere un mayor ancho de banda que una modulación AM, sin embargo ofrece una mayor robustez ante la interferencia y el desvanecimiento.

En la imagen 2.1 se puede apreciar la señal mensaje de color rojo junto con su portadora de color verde y en la parte inferior la señal a transmitirse de color azul que cambia su frecuencia proporcionalmente a la amplitud de la señal mensaje.

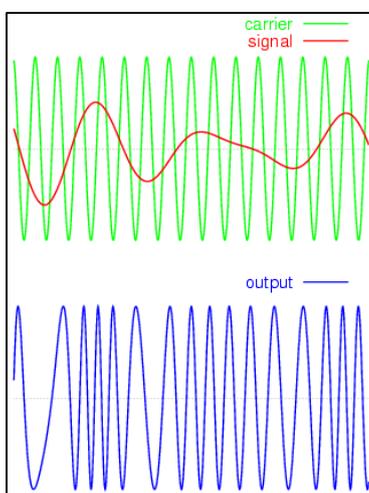


Figura 2.1 Modulación de frecuencia [22]

El circuito para generar señales de alta frecuencia es un oscilador LC aunque en la actualidad hay circuitos electrónicos como el Oscilador Controlado por Voltaje (VCO) donde la frecuencia varía proporcionalmente al voltaje que se le inserta;

al enviarle 0V el VCO genera una frecuencia denominada frecuencia libre de oscilación que ante cambios en la entrada la frecuencia sube o baja proporcionalmente.

La modulación en frecuencia en FM de radiodifusión trabaja de 87 a 108 MHz, con una separación de 200 KHz y la desviación de 75 KHz [22].

## 2.4 Demodulación FM

La demodulación FM tiene un número de técnicas que sirven para recuperar la señal que lleva la onda de frecuencia central o portadora que fue transmitida o modulada en el transmisor.

Entre estos demoduladores se encuentran simples como el de un limitador de banda, diferenciador lineal seguido por un detector de envolvente, así como un detector de lazo de seguimiento de fase para realizar la diferenciación se utiliza un amplificador operacional o un circuito sintonizado así como el discriminador Foster – Seeley.

Finalmente la señal demodulada pasa través de un amplificador final de audio con la potencia necesaria mínima para hacer funcionar un altavoz.

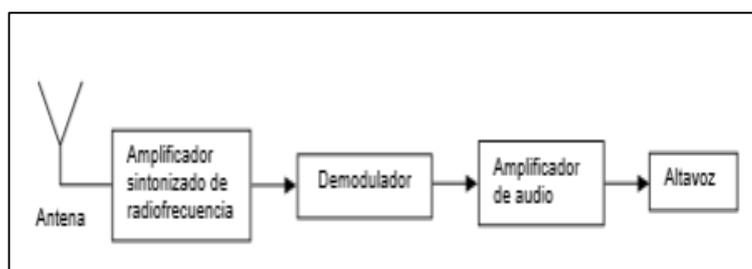


Figura 2.2: Recepción de una señal de radio [23]

## 2.5 Transmisión FM

Lo primero que se hace en la transmisión FM es que los sonidos humanos que son ondas electromagnéticas se los transforma en señales eléctricas debido a que mueve el diafragma del micrófono que está conectado a una bobina y la

misma envuelve a un imán. Las vibraciones de los sonidos hacen que la bobina se desplace a través del imán produciendo así una corriente eléctrica que pasa a través de una consola con la cual se puede aumentar la magnitud de las ondas y alterar la frecuencia de la señal modificando cada uno de los coeficientes de Fourier, esto ayuda a cambiar de forma independiente los sonidos graves, agudos y medios [24].

Como esta señal eléctrica sigue siendo débil necesita ser modulada en frecuencia. Como se explica anteriormente se crea una portadora que va a ser la señal de alta frecuencia que ayude a transmitir nuestro mensaje a través de un oscilador, luego va a pasar a través de un amplificador para de esa manera aumentar su potencia.

Con la señal mensaje y la portadora se comienza la modulación en frecuencia, la resultante será la señal de salida también llamada radiofrecuencia que tendrá que ser amplificada de acuerdo al permiso que se tenga o al transmisor que se esté usando, esta señal por último tiene que pasar a través de un filtro pasa banda para eliminar las señales armónicas que se producen por la modulación para no afectar a los canales adyacentes ni a otros servicios de radiodifusión, y por último es enviada a la antena para enviar al espacio lo que son las ondas electromagnéticas. Esta onda estará entre 88 MHz y 108 MHz [22].

### **2.5.1 Los transmisores**

El transmisor FM es el encargado de modular la señal y es el que contiene una o varias etapas de amplificación de la señal según sea necesario.

Los transmisores están contruidos con una infinidad de transistores de tipo MOSFET para la etapa de amplificación, cuando se los prueba hay que procurar que estos estén conectados a la antena o a una carga fantasma que puede simular ser antena sin tener que transmitir ondas electromagnéticas debido a que se puede quemar el transmisor ya que la corriente no tendría por donde pasar y se regresaría al equipo a dañarlo.

Los transmisores deben estar bien separados de los estudios de audio para que las ondas de radiofrecuencia pueden afectar los equipos de audio produciendo algún tipo de ruido.

Los cables que se usan para llevar la información del transmisor a la antena son de tipo coaxial y hay que procurar que no sean bien largos para que la señal no sufra de atenuaciones.

### **2.5.2 Amplificadores**

Los amplificadores sirven para que las señales cubran localidades más extensas como una ciudad entera; estos pueden colocarse en cascada y las ganancias de cada uno de ellos se va sumando hasta cumplir los requerimientos siempre y cuando esté bajo las normas de potencias máximos permitidos en la localidad.

La mayoría de estos amplificadores tienen una impedancia de entrada y de salida de 50 ohmios, es preferible que el transmisor y el amplificador tengan la misma impedancia de salida como de entrada respectivamente para que haya entre ambos equipos el flujo máximo de energía eléctrica. La diferencia de impedancia entre los distintos equipos que son necesarios para la transmisión FM reduce la eficiencia de la transmisión por lo que podría afectar gravemente al envío de las señales [25].

No es fácil determinar la cantidad de área que se cubre con la cantidad de potencia que posee la señal ya que el área que se cubre depende también de la altura en la que se encuentra la antena.

La antena debe estar en un lugar sumamente alto como mínimo entre 12 y 15 metros sobre la tierra, si es posible en una colina porque debe haber línea de vista entre la antena transmisora y la antena receptora.

En la siguiente tabla se mostrara el área a cubrirse en caso de estar en una colina de aproximadamente 150 metros o en una edificación de 10 pisos, la antena se encuentra a una altura de 15 metros sobre el suelo y tiene 6db de ganancia, clima y medio de propagación ideal [26].

Potencia	Distancia a la redonda cubierta
<b>1 Watt - 5 Watts</b>	1 a 5 kilómetros
<b>5 Watts</b>	5 a 10 kilómetros
<b>15 Watts</b>	Hasta 15 kilómetros
<b>25 Watts</b>	Hasta 20 kilómetros
<b>50 Watts - 100 Watts</b>	25 a 35 kilómetros
<b>1000 Watts</b>	Hasta 50 kilómetros
<b>2000 Watts</b>	Hasta 100 kilómetros
<b>5000 Watts</b>	Máximo 120-150 kilómetros

Tabla 12. Distancias de cobertura según potencia transmitida [26]

Hay que tener en cuenta también que la carga que esté conectada a la salida del amplificador pueda soportar el nivel de potencia de salida.

El amplificador es conectado a una fuente de poder que también hay que tener cuidado al momento de hacer la conexión para evitar daños en el transmisor, para realizar esta conexión se requiere un alambre aislado (12 – 16 AGW).

### 2.5.3 Fuente de poder

Como los transmisores necesitan una cierta cantidad de voltaje a corriente continua (DC), los equipos que se encargan de la transformación de los 110 voltios en corriente alterna (AC) a una cantidad de voltaje a corriente continua son las famosas fuentes de poder que se ha visto en todas partes en nuestra vida cotidiana, como el cargador de nuestra laptop o de nuestro propio teléfono celular [25].

Los amplificadores que son de alta potencia requieren más corriente a su entrada que los de baja potencia y la fuente apropiada para debe darle más corriente que la que el amplificador demanda.

#### **2.5.4 Filtros**

Los filtros son de suma importancia en la radiodifusión ya que ayudan a evitar que las señales se interfieran unas con otras, de esta manera se evita cualquier inconveniente con las organizaciones gubernamentales que se encargan de controlar las telecomunicaciones, son colocados entre el transmisor y la antena.

Los filtros de radiofrecuencia (RF) son de tres tipos que son pasa bajo, pasa banda y paso alto, los mismos que son colocados entre el transmisor y la antena.

Los filtros eliminan las señales armónicas que aparecen debido al transmisor por la modulación de la señal; estas señales armónicas son ondas con menos potencia iguales a la señal que se transmite y su frecuencia centra ( $f_c$ ) es múltiple de la frecuencia central principal, aunque estas señales son de menos potencia que la original, igual produce una interferencia a los demás sistemas de comunicación inalámbrica [25].

En caso de no existir los filtros, la primera armónica de la señal FM afectaría a una parte de la banda VHF de televisión.

Los transmisores que tengan una potencia de salida por debajo de los 25 vatios necesitan por lo menos un filtro de 7 polos y los transmisores que tengan una mayor potencia uno de 9 polos, mientras mayor cantidad de polos tenga el filtro, mayor será la atenuación que se le dé a la señal que se transmita.

### 2.5.5 La antena

La antena es un transductor de metal que es creado con la idea de recibir o enviar ondas electromagnéticas, estas ondas producidas viajan con el fin de enviar algún tipo de información desde la antena, que es la que transmite las ondas electromagnéticas, la cual debe estar configurada de acuerdo a la frecuencia que va a transmitir, correctamente instalada y orientada hacia la antena receptora en el equipo o en lugar donde se desea captar esta información.

Para el caso de las antenas que reciben o envían señales de radiofrecuencia (FM) se necesitan antenas tipo no direccionales, debido a que es necesario que esta información viaje de manera uniforme a las radios receptoras de un pueblo, ciudad, etc.

En específico, para recepción de radiofrecuencia de TV o radio FM, las antenas más usadas son conocidas como antenas de hilo, como la monopolo, dipolo, pero para una mejor propagación es utilizada la antena Yagi.

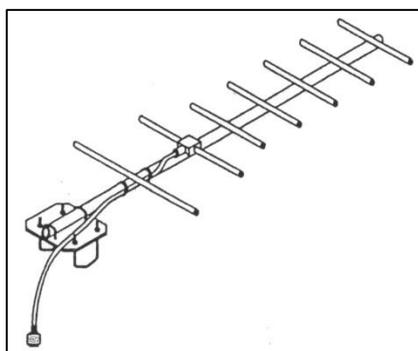


Figura 2.3: Antena Yagi [27]

Entre las antenas debe haber línea de vista debido a que las ondas de radiodifusión FM viajan en línea recta hasta que encuentra una obstrucción.

### 2.5.6 Propagación

La propagación de ondas de radio difiere mucho en su estudio de cualquier otro tipo de transmisión ya que son medios de transmisión guiados que utilizan cables coaxiales, que se compone de un conductor dentro de un material aislante y al mismo tiempo rodeado de una malla metálica.

Las ondas de radio proponen un estudio de una propagación no guiada susceptible a cambios en el medio, como lluvia, viento, nubes, etc., y al entorno de propagación sean estos pueblos, ciudades o metrópolis, incluso de manera más exhaustiva a los materiales por donde la onda pasa como madera, cemento, ladrillo, etc.

Existen muchas clases de estudios, pero estos se dividen para un mejor estudio en modelos: exteriores e interiores.

Para cada modelo se analiza tanto las grandes como pequeñas variaciones y obstáculos que provocan mayor o menor pérdida a la onda electromagnética que representa la información deseada por parte del usuario.

La pérdida en exterior es una suma de muchos comportamientos del tipo de onda con su respectiva potencia en el medio, efectos físicos del medio como la difracción, la reflexión y la distancia recorrida, provocan que sea menor la potencia que reciba el receptor

Con el fin de tener una idea práctica del comportamiento de estas ondas en el exterior se han realizado estudios y modelamientos matemáticos y curvas que ayudan a los ingenieros a tomar decisiones respecto a su construcción y parámetros técnicos, como por ejemplo el modelo FCC.

También existen modelos de propagación puerta adentro, que toma en consideración la distancia entra entre piso y piso, material de las paredes, así como factores internos ya sea mueblería, ventanas e incluso personas, con el fin de garantizar un nivel mínimo de potencia que permita una correcta recepción de la información del sistema, en general los

modelos de propagación en interiores se los puede dividir en dos clases: los que tienen línea de vista (LOS), y los que tienen línea de vista pero con obstrucciones (OBS) como el modelo de propagación COST-231.

Las emisiones de radio ondas de tipo VHF que comprenden todo el rango de la radio FM, este tipo de ondas son principalmente afectadas por la capa de la atmósfera conocida como tropósfera, la tropósfera tiene un índice de refracción que depende de la altura y permite que la onda transmitida se curve, esta refracción es producida por las moléculas de agua, en algunos casos permite transmitir ondas a distancias muy superiores a las previstas, sin embargo en la tropósfera las ondas de más 10 cm de longitud de onda no sufren atenuación apreciable pero esta va aumentando conforme el tamaño de onda va disminuyendo, donde se pueden presentar atenuaciones considerables al momento de transmitir [28].

## **2.6 Recepción de FM**

Para que el equipo pueda recibir la señal FM necesita estar por encima del nivel de sensibilidad del mismo, para el caso de FM la sensibilidad es de -90 dbm, todo lo que no entre dentro de ese rango, el receptor no lo reconocerá [12].

El mensaje de la señal FM se pueda demodular solamente si la señal receptada tendrá que tener una relación señal vs ruido (SNR) mayor al mínimo especificado que es de 26 db.

La SNR es la relación entre la potencia de la señal mensaje con la potencia del ruido para ver qué tan bueno es el mensaje que se transmite, es decir a mayor SNR mejor será la calidad de recepción del mensaje.

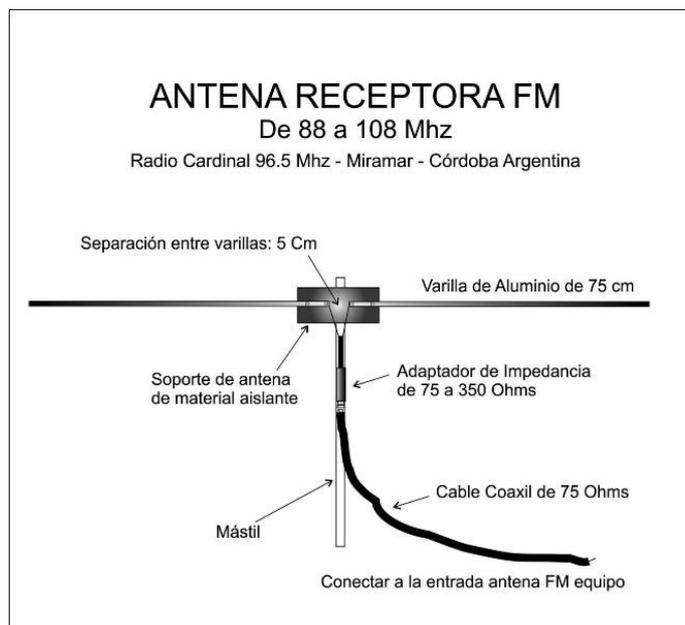


Figura 2.4: Antena receptora de FM

## 2.7 Uso del espectro radioeléctrico en FM

En varios artículos, investigaciones y demás se ha demostrado que no hay uso eficiente del espectro radioeléctrico debido a que entre los canales hay espacios en blanco, Además, hay mejoras de comunicación como la digital que ocupa menor ancho de banda y logra enviar mayor información con la misma calidad de sonido [1][8][2].

### 2.7.1 Mala distribución de canales

Las estaciones de radiodifusión están asignadas de manera ineficiente en el país de Panamá ya que hay emisoras con separaciones de hasta 600 KHz, debido a esto habrá un reordenamiento de canales de radiodifusión y para Enero del 2016 todos los oyentes tendrán que sintonizar las nuevas frecuencias, este hecho ayudará a tener un mejor control y así evitar

transmisiones piratas, como es el caso de otros países en Centroamérica [8][1][29].

La comunicación digital permite la existencia de una mayor cantidad de canales ya que al convertir una señal analógica en digital, los bits de esta señal ocupan menos espacio radioeléctrico, es decir menor ancho de banda.

Otro de los beneficios que tiene la digitalización de las emisoras analógicas es enorme ahorro para el país aproximadamente de unos 25 millones de dólares anuales ya que el costo de transmitir en FM es ocho veces mayor que una transmisión digital, esto es porque los transmisores analógicos consumen mucho más energía que los transmisores digitales [30].

## **2.8 Acceso dinámico al espectro**

Se sabe que el espectro es un recurso muy limitado y que su demanda crece a medida que pasan los años por el aumento de dispositivos que requieren transmisión de datos.

Para utilizar más eficientemente el espectro se requiere que las bandas de frecuencia licenciadas sea usadas de forma dinámica esto se denomina Acceso Dinámico al Espectro (DSA) [31].

Es importante conocer a nivel mundial cuáles son las bandas más utilizadas y cuáles no haciendo mediciones necesarias de las distintas bandas en un tiempo prolongado por la cantidad de datos requeridos para el modelamiento de disponibilidad de los canales de la banda escaneada y de esa manera ver la factibilidad de crear dispositivos de acceso dinámico al espectro como la radio cognitiva y cambiar las normas jurídicas que regulan actualmente las telecomunicaciones [32].

Actualmente, investigaciones han demostrado que el espectro no está siendo utilizado eficientemente, se encuentran canales disponibles ya sea

permanentemente o temporalmente y se los denomina Espacios en Blanco (White Spaces) [31][33][35].

Existen varias formas de acceder al espectro descritas en la siguiente figura:

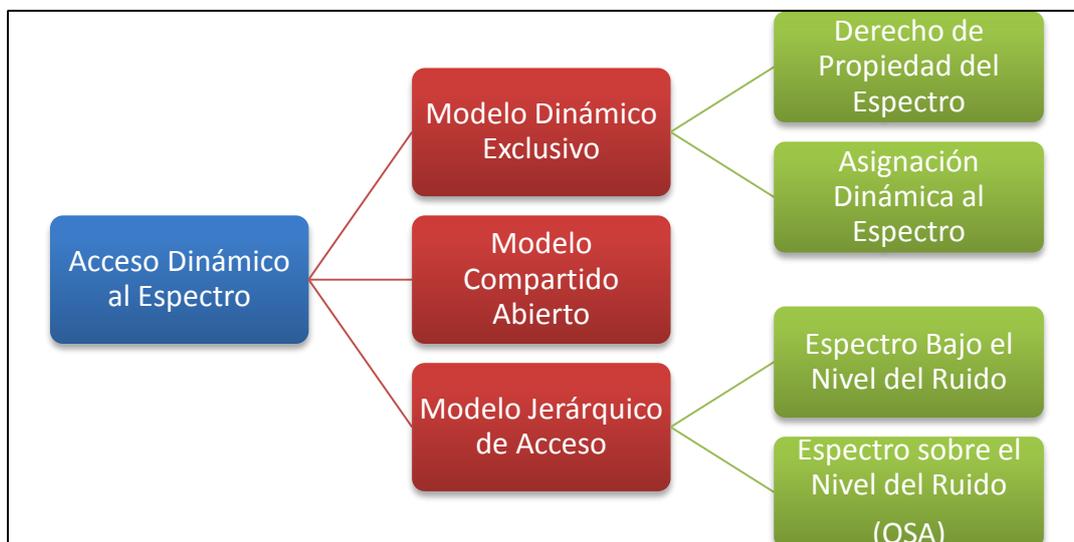


Figura 2.5: Clasificación del acceso dinámico al espectro [34]

### 2.8.1 Modelo dinámico exclusivo

El Modelo Dinámico Exclusivo se basa en las políticas y regulaciones que actualmente están vigentes sobre las telecomunicaciones, donde las bandas concesionadas solo pueden ser usadas por el propietario, pero con la idea de que haya una pequeña flexibilidad, para que la frecuencia pueda ser usada de una mejor manera.

Este modelo se clasifica en derecho de propiedad del espectro y asignación dinámica al espectro.

- **Derecho de propiedad del espectro.-** Esto permite que los dueños de las concesiones de las bandas puedan subarrendar sub-bandas de frecuencia a terceras personas para que lo usen de la manera que ellos creen conveniente, decir brindando el

servicio inalámbrico que ellos vean más factible. Esto actualmente no está permitido y no está bien visto por los reguladores que son organismos gubernamentales debido a que ellos son los únicos encargados de distribuir la frecuencia en un país.

- **Asignación dinámica de espectro.-** Esto busca administrar un sistema de radio que tiene una convergencia a cierta distancia, analizar su uso y ver si es factible compartir su banda entre diferentes redes de acceso de radio (RANs), buscando áreas que no tengas cobertura de servicios y espacios de frecuencia que no estén en uso, de esta forma se estaría optimizando el uso de la frecuencia.

Es decir que un espacio de espectro se puede asignar entre dos o más redes de comunicación que se pueden adaptar con variaciones temporales o espaciales según la necesidad de la red, aunque si la red solamente puede usar el espacio espectral adicional de la red que se encuentre adyacente a la misma y si este espacio espectral ha sido liberado por la red primaria que se encuentre utilizándola [37].

Este modelo se vuelve ineficiente cuando un bloque de espectro es repartido entre más de dos redes de comunicación debido a que el espacio compartido se reduciría.

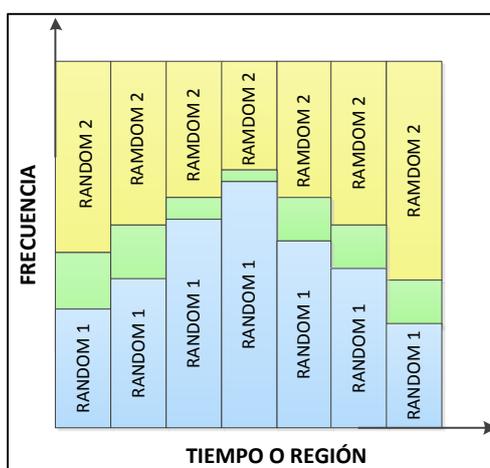


Figura 2.6: Asignación dinámica al espectro

### 2.8.2 Modelo compartido abierto

El objetivo de este modelo es que todas las tecnologías como WIFI, Bluetooth que operen en la banda Industrial, Científica y Médica (ISM), compartan la porción del espectro, el mismo que es asignado por la UIT.

Busca que el espectro sea manejado por los usuarios y no por las operadoras o el estado, como lo es actualmente, para que sea más de uso social que comercial y no tenga un número limitado de usuarios, esto siempre y cuando que no haya interferencia entre los usuarios.

### 2.8.3 Acceso jerárquico

El sistema de acceso jerárquico permite diferenciar entre dos usuarios, los primarios que son lo que tienen licencia al espectro (PU) y los secundarios (SU) que cumplen las reglas mínimas de transmisión, la idea de este modelo es acceder al espectro del usuario primario por el segundo usuario siempre y cuando no perjudique en la comunicación del usuario primario.

Estas se subdividen en dos clases en espectro bajo el nivel del ruido y espectro sobre el nivel de ruido, la segunda se la conoce comúnmente como Acceso Oportunista al Espectro (OSA).

- **Espectro bajo el nivel de ruido.-** Se caracteriza por tener un nivel muy controlado de transmisión de potencia con el fin de transmitir datos para los que el usuario primario consideraría ruido, es decir de manera permanente aunque el usuario primario siga en uso de su canal, para esto es importante transmitir en canales de bandas anchas que sufren menos problemas específicos de ruido [38]. Como se puede apreciar en la figura 2.7 los usuarios secundarios tienen la ventaja de transmitir en todo momento por lo tanto no hace falta detectar espacios en blanco de la banda de los usuarios primarios, esta comunicación no causaría interferencia con los

usuarios primarios, ya que la potencia de transmisión de los usuarios secundarios es tan baja que sería tomada como ruido por parte de los usuarios primarios, aunque la desventaja de transmitir a poca potencia sería el menor radio de cobertura.

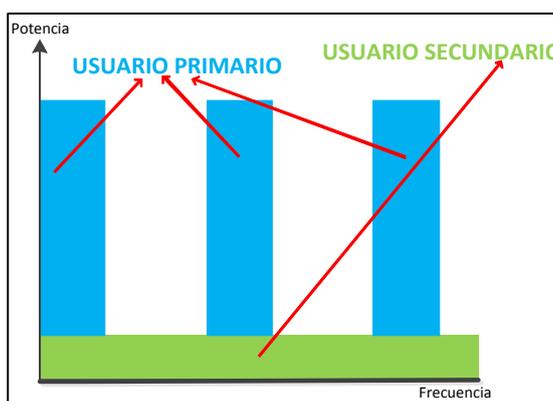


Figura 2.7: Espectro bajo el nivel del ruido

- **Espectro sobre el nivel de ruido.**- La potencia de transmisión por parte de los usuarios secundarios no es restringida, pero sí a la cantidad de información que se transmite ya que en un canal no se realiza de forma continua. El usuario secundario lo que hace es que tiene que detectar los espacios en blanco en la comunicación del usuario primario, este espacio en blanco es una parte de la frecuencia en un periodo de tiempo en el que el usuario primario no está haciendo uso de la misma. Es decir utiliza el espectro de manera oportunista [34][38].

Para llevar a cabo con eficiencia esta metodología hay que hacer un estudio estadístico de todos los sistemas de comunicación inalámbrica para ver cuáles son las bandas más precisas, es decir las bandas que tengan una disponibilidad elevada.

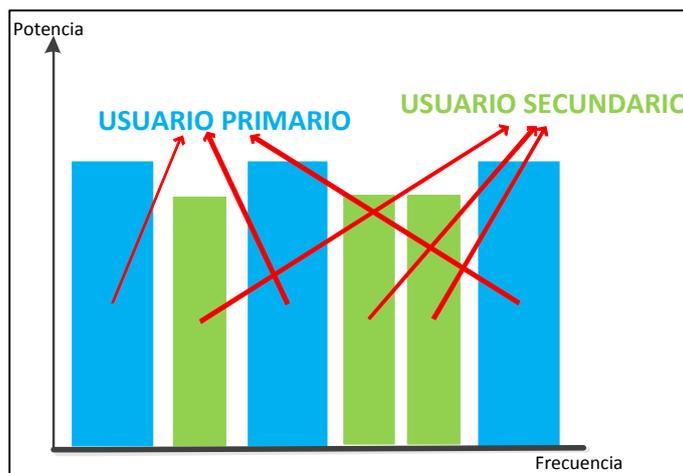


Figura 2.8: Espectro sobre el nivel de ruido

## 2.9 Radio cognitiva

Es un modelo de tecnología donde los dispositivos de radio escanean periódicamente el espectro radioeléctrico para buscar canales disponibles y cambiar sus parámetros de recepción y transmisión de acuerdo al medio donde se encuentren con el objetivo de realizar una transmisión de datos de manera eficiente [35].

Esta tecnología sería de mucha ayuda para los sistemas de comunicación que se encuentran sobresaturados en ciertas zonas como el WIFI debido a la cantidad de usuarios sin licencia que se encuentran usando esa tecnología al mismo tiempo.

Sin embargo hay ciertos esquemas que no se han tomado en cuenta, como el hecho de que no se puede hacer una medición de la interferencia que se da en el canal que está siendo utilizado por el usuario primario, convirtiéndola en un modelo de predicción poco fiable. Además los problemas de velocidad propios del hardware impiden su fácil reconocimiento, finalmente hay que analizar el comportamiento y la coordinación de múltiples radios cognitivas en un mismo espacio para evitar interferencias [36].

Como la radio cognitiva debe escanear un rango amplio de frecuencias, requiere un gran número de trancceptores para cada una de estas frecuencias y una gran

capacidad de procesamiento en poco tiempo, esto se vuelve difícil de implementar debido al alto requerimiento tecnológico, lo que impide explotarlo en su máximo potencial [36].

## 2.10 Espacios en blanco

Los espacios en blanco son aquellos rangos en el tiempo en la que la frecuencia no llega a un nivel de potencia suficiente para ser captada o demodulada [33][35].

Los espacios en blanco (whites spaces) se encuentran ya sea porque un tipo de servicio inalámbrico no se encuentra transmitiendo datos en un periodo de tiempo o los canales están muy separados entre sí para evitar interferencias.

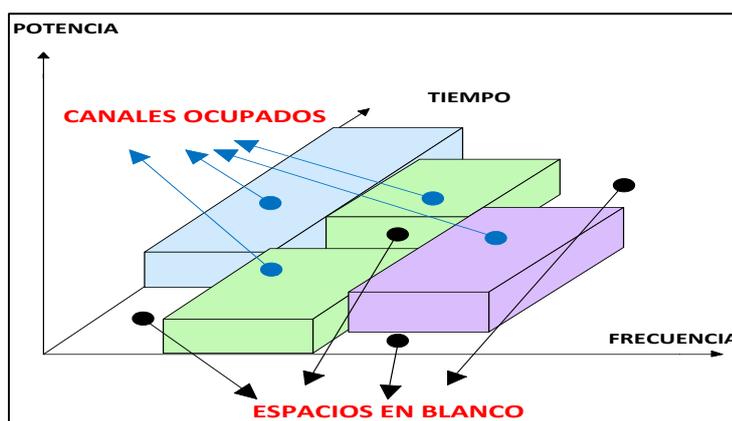


Figura 2.9: Espacios en blanco [39]

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) que es la encargada de la regulación de las telecomunicaciones interestatales e internacionales, permitía el uso de espacios en blanco principalmente los de televisión con el objetivo de que se puedan abrir nuevas industrias o con el fin de que las personas puedan acceder a la banda ancha de una forma más económica [35].

## 2.11 Acceso oportunista al espectro (OSA)

El acceso oportunista trabaja de la forma del modelo Espectro sobre nivel de ruido, el objetivo es usar el espectro de manera eficiente, donde los usuarios primarios (PU) y los usuarios secundarios (SU) puedan compartir una misma porción del espectro, donde los usuarios primarios siempre tienen la prioridad y los secundarios (SU) sólo lo usarán cuando el primario no esté en su uso.

El usuario secundario deberá identificar el espacio en blanco para comenzar su comunicación, mientras el usuario secundario esté transmitiendo la información, este debe estar en constante monitoreo de requerimiento de uso de canal por parte del usuario primario para de esta manera no afectar con su comunicación, además también buscar a la par otro canal disponible de respaldo para continuar con su comunicación de forma continua.

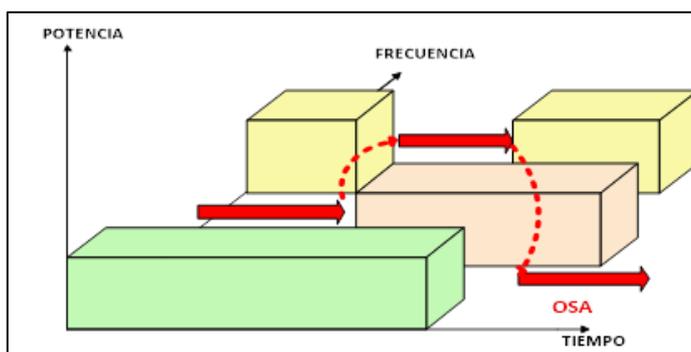


Figura 2.10: Acceso Oportunista al Espectro [39]

La arquitectura OSA tiene 3 componentes muy importantes que son: detección del espectro, acceso al espectro y cambio de espectro, los tres trabajan simultáneamente para acceder a los espacios en blanco de forma eficiente [39].

## 2.12 Detección del espectro

Esta es la parte más importante de la arquitectura OSA ya que permite reconocer los espacios donde el usuario primario se encuentra inactivo, para que posteriormente se dé la transmisión o recepción de paquetes.

Durante la comunicación del usuario secundario también se lo usa para la detección de requerimiento de la banda por parte del usuario primario para de esta manera evitar cualquier tipo de interferencia. La detección del espectro puede ser dividida en dos tipos: detección local y detección cooperativa.

En la figura 2.11 se puede ver más detalladamente la clasificación de la detección del espectro.

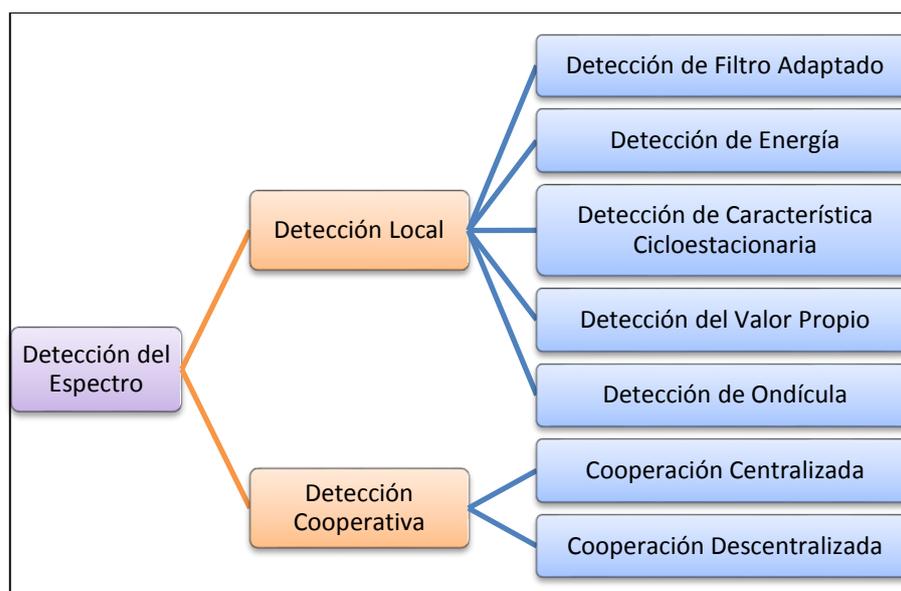


Figura 2.11: Clasificación de la Detección Espectral [39]

- **Detección local.**- Es como los usuarios secundarios detectan los espacios en blanco de manera individual; esta detección local se la realiza de cinco formas diferentes como lo indica la gráfica anterior, pero entre esas detecciones son tres las que más se

destacan que son: detección de la energía, detección de filtro adaptado y detección de característica cicloestacionaria.

La detección de filtro adaptado se basa en un conocimiento previo de la señal del usuario primario como su modulación, tipos de paquetes, etc., para correlacionar la señal recibida con la señal del usuario primario correspondiente, muestreando la salida y detectando si la señal recibida le corresponde al usuario primario. El beneficio de la detección de energía es que a diferencia de la anterior esta detección no necesita un conocimiento previo de la señal receptada por lo que se haría más fácil la implementación, se basa en la medición de la energía de la señal receptada y comparar con el umbral de recepción o sensibilidad del equipo receptor que es la señal mínima que puede reconocer el dispositivo que este umbral es definido por normas internacionales y cumplidos por los fabricantes. Si la energía receptada es superior al umbral significa que el espacio de espectro en ese instante de tiempo se encuentra ocupado por lo que esa señal pertenece al usuario primario.

La contraparte de este método es que cuando el umbral es muy bajo es vulnerable a una alta potencia del ruido, es decir, si la potencia del ruido es muy alta y la de la señal transmitida es muy baja se puede ver una falsa disponibilidad o perder detecciones de espacios en blanco.

**Detección de característica cicloestacionaria.-** este método reconoce la transmisión para los usuarios primarios basándose en la periodicidad de la señal debido a que hay cambios repetitivos en periodos de tiempo semejantes, este comportamiento se encarga de diferenciar a la señal modulada de la interferencia y del ruido.

El valor cicloestacionario de la señal recibida es una característica física que puede ser introducida en las señales digitales para que la detección sea mejor, ya que el ruido es estacionario y no tiene

ningún tipo de correlación, las características cicloestacionarias ayudan a diferenciar los usuarios primarios y el tipo de modulación. Las señales OFDM son cambiadas antes de ser enviadas aumentando el número de características de la señal para poder diferenciar de forma más efectiva el tipo de la señal, la contraparte de esto es el aumento de la utilización del ancho de banda por el aumento de números de bits que se introdujeron en las señales digitales [40].

**Detección del valor propio.-** elige los valores propios de la matriz de covarianza de la señal recibida para ver si hay una señal del usuario primario en transmisión.

**Detección de ondícula.-** un método que usa un algoritmo que se denomina transformada de ondícula, este proceso matemático da más información que la transformada de Fourier y ayuda a detectar las señales de usuarios primarios. Este método se lo utiliza en espectros con un gran ancho de banda y trabaja en la densidad espectral de potencia de las sub-bandas [41].

**Detección cooperativa.-** Esta detección es mucho mejor que el método local ya que los usuarios secundarios no trabajan de forma individual para la captura de espacios en blanco y hay dos métodos que son el centralizado y el descentralizado.

**Cooperación descentralizada.-** basa en que todos los usuarios secundarios intercambias sus detecciones locales, una vez que se realiza estos intercambios cada usuario lo analiza y posteriormente tiene la información del estado de la banda.

**Cooperación centralizada.-** Por lo contrario a la anterior mencionada, los usuarios secundarios intercambias sus detecciones locales con centro que conecta a los usuarios secundarios como una estación base y este elemento es el que se encarga de analizar la información y tener el estado de la banda.

### **2.1.1. Acceso al espectro**

El usuario secundario podrá acceder al espectro solamente si el usuario primario no esté en uso del mismo y como la disponibilidad del espectro no es constante, el usuario secundario tiene que saltar dinámicamente entre canales repetidamente.

La arquitectura OSA usa protocolos MAC multicanal con el fin de reducir la interferencia co-canal y a la vez aumentando la tasa de datos, pero este protocolo no puede ser usado por los usuarios primarios ya que se requiere que los canales sean estáticos, no dinámicos.

Sin embargo se están desarrollando algoritmos matemáticos y protocolos para mejorar los accesos dinámicos por parte de los usuarios primarios es usando un canal de control es decir un control del canal común que ayude a coordinar los canales para la comunicación de los usuarios.

### **2.1.2. Cambio de espectro**

Cambio espectral está compuesto de dos fases que son la detección del usuario primario y el enlace de mantenimiento.

La detección del usuario primario se refiere a que mientras los usuarios secundarios estén en recepción o transmisión de datos tienen que desocupar el canal cuando detecten la aparición del usuario primario para esta detección el usuario secundario necesita estar en constante monitoreo de requerimiento.

Después de la liberación del canal el usuario secundario ejecutará el enlace de mantenimiento con el fin de concluir la comunicación. Para lo tanto monitorea todos los canales hasta encontrar un nuevo canal disponible [42].

## CAPÍTULO 3

### 3. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO DE ESTUDIO

En los capítulos anteriores se realizó un análisis de la problemática actual del uso del espectro radioeléctrico, un estudio extenso de la radiodifusión FM, los parámetros que la involucran, las políticas actuales en el Ecuador y una de las posibles soluciones para un mejor uso del espectro radioeléctrico como es OSA, que se podrán plantear en el futuro con dispositivos que podrán hacer realidad un uso más eficiente del espectro. También se describieron todos los parámetros de esta solución para tener en claro qué papel desempeña cada uno de ellos en esta arquitectura.

En este capítulo se va a explicar cada una de las herramientas que se usaron para la medición de los canales, las características de cada una de ellas, así como una breve descripción del escenario donde se desarrolló el estudio de canales de radiodifusión FM.

Para realizar el estudio de disponibilidad de canales de la banda FM se eligió una ciudad metropolitana como la ciudad de Guayaquil debido a la gran cantidad de habitantes y dispositivos de recepción y/o transmisión inalámbricos que posee en comparación con otras ciudades del Ecuador.

El análisis se lo realizó en el Condominio Pegar, que es un edificio de doce pisos de altura y está ubicado entre las calles Cristóbal Colón Fontanarrosa y Boyacá. La zona donde se ubica el edificio es en la parte céntrica de la ciudad donde a sus alrededores hay gran cantidad de población y edificios de similares estructuras.

La toma de datos se lo realizó en tres lugares estratégicos del edificio que son la planta alta, el quinto piso y la planta baja para poder observar la variación del comportamiento de la señal de radiodifusión FM en cada uno de los pisos seleccionados.

Los datos obtenidos son los niveles de potencia que se encuentra en el espacio del espectro, cuyo valor dará la información si el canal se encuentra disponible u

ocupado cuando se lo compara con la sensibilidad del equipo receptor que se encuentra especificado en manuales de los mismos.

Estos datos se los modela para aproximarlos a dos funciones estadísticas conocidas para predecir de mejor manera el comportamiento de la señal y ver la factibilidad de usar la banda para el acceso oportunista.

### 3.1 Metodología

Para la medición del espectro radioeléctrico de la tecnología FM se utiliza una antena, un analizador espectral, una computadora y una programación realizada en el software de Matlab.

En la figura 3.1 se muestra la estructura de la conexión de los equipos que se utilizan para la captura de datos.

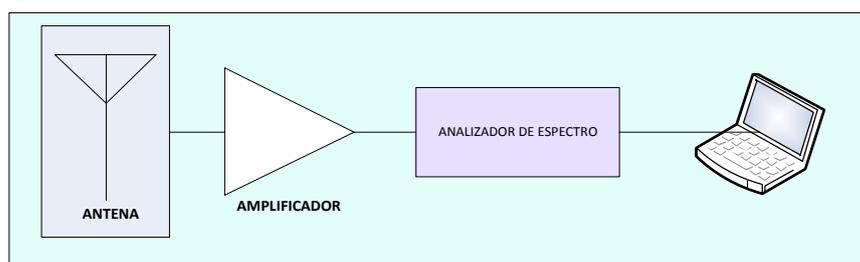


Figura 3.1: Conexión para la captura de datos

El analizador de espectro que se usó fue un RTL-SDR, que es una radio definida por software que utiliza un sintonizador de radio con el chip RTL2832U. La ventaja de este dispositivo es que cuesta alrededor de 20 dólares, siendo cientos o hasta miles de dólares más económico que un analizador espectral como el USRP.

La configuración en el software que se le implemente al dispositivo le permitirá escanear los canales que se requieran, esto también dependerá de la capacidad del equipo.

Este equipo tiene varias aplicaciones como:

- Escuchar radio FM

- Escuchar radiodifusión de audio digital (DAB)
- Recepción de señales GPS
- Analizador de espectros

Los rangos de captura del RTL-SDR dependen del chip interno del equipo, en la siguiente tabla se detallara los diferentes rangos y a qué tipo de configuración interna del dispositivo pertenece.

Sintonizador	Rango de Frecuencia
Elonics E4000	52 - 2200 MHz
Rafael Micro R820T	24 – 1766 MHz
Rafael Micro R828D	24 – 1766 MHz
Fitipower FC0013	22 – 1100 MHz
Fitipower FC0012	22 – 948,6 MHz
FCI FC2580	146 – 308 MHz y 438 – 924 MHz

Tabla 9: Clasificación de sintonizadores del RTL-SDR

La radiodifusión FM puede ser capturada por cualquiera de esos sintonizadores menos para el FCI FC2580, para nuestro proyecto se usa el sintonizador Rafael Micro R820T. Las partes más fundamentales en el RTL-SDR se pueden observar en la figura 3.2.

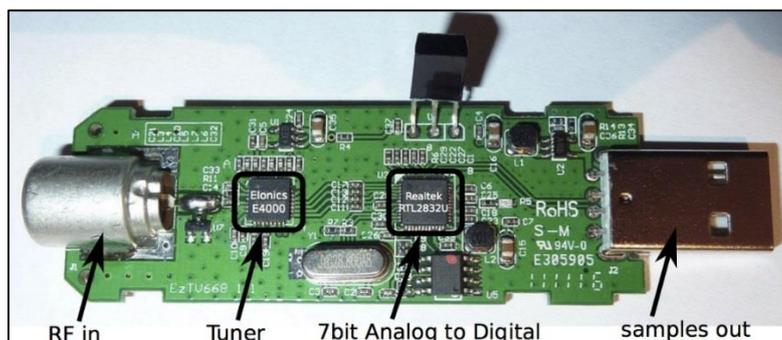


Figura 3.2: Componentes Fundamentales del RTL-SDR

Este dispositivo RTL-SDR es compatible con el software de Matlab, con comandos o haciendo diagramas con la herramienta del software llamada Simulink para la elaboración de diseños o estructuras que ayudan a trabajar con señales inalámbricas en tiempo real, ya sea solo receptándolas o procesarlas con un fin específico como guardar datos de una banda para un estudio de su comportamiento en el tiempo.

La librería que usa Matlab para poder ser compatible con el RTL-SDR se denomina Communications System Toolbox.

Además tiene otros parámetros adicionales que se le pueden configurar que es la frecuencia central que puede ir desde los 22 MHz hasta los 2200 MHz y una tasa de muestreo que puede ir desde los 225 MHz hasta 300 KHz y desde los 900 MHz – 2560 KHz, estos rangos de captura no presentan pérdidas en el muestreo, pero la máxima tasa de datos permitida en el dispositivo es de 3200 KHz.

Para este caso lo que se debe hacer es analizar siete rangos de un ancho de banda de 2800 KHz cada uno, tomando todos los valores de potencia, cada rango se lo subdivide en catorce canales para de esa manera cumplir con el ancho de banda de 200 KHz del sistema de radiodifusión FM y un rango de muestra permitido por el RTL-SDR.

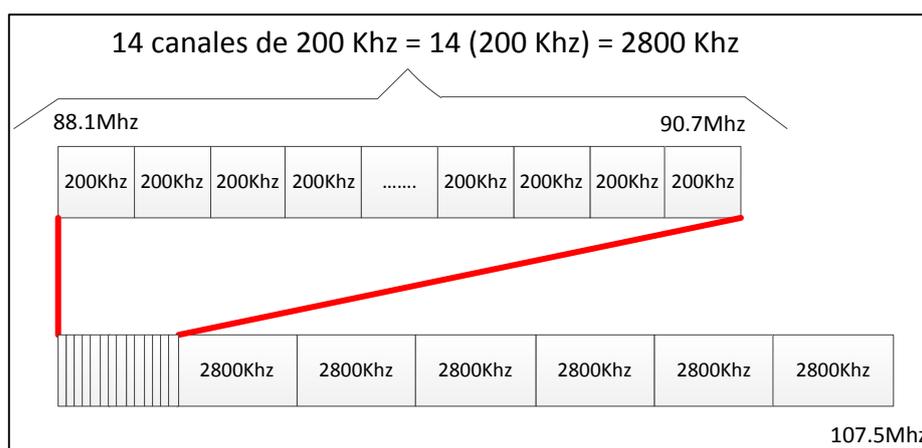


Figura 3.3: Configuración de los canales para el RTL-SDR

Las emisoras de radio están separadas cada 400 KHz aunque su ancho de banda es de 200 KHz, en el proyecto se analiza todos los canales cada 200 KHz para analizar su comportamiento en el tiempo. Debido a que las emisoras en la ciudad de Guayaquil están asignadas hasta la frecuencia portadora de 107.3 MHz, se descarta los datos de la frecuencia de 107.5 MHz.

### 3.2 Modelamiento

Para modelamientos estadísticos se tomaron un total de 20000 muestras en el tiempo de una semana para ver el comportamiento de la señal a través de los días. El dispositivo se demoraba aproximadamente 16 segundos en hacer un barrido de 98 canales, por cada canal que analiza salen 256 valores de potencia y de esos valores se encarga de tomar el valor máximo como el valor que se debe guardar en la muestra.

Matlab ayuda a que los valores agrupados de catorce canales se guarden en un archivo con extensión .mat, por lo tanto habrá siete archivos por cada planta en el edificio.

La extensión .mat beneficia a que si el programa llega a colapsar no habrán pérdidas de datos como sería en caso si se guardaran en una variable cualquiera en el Workspace del software.

Los rangos de valores de potencia mínimos y máximos obtenidos en la banda de FM se detallan en la siguiente tabla.

Piso	Potencia	
	Mín.	Máx.
Planta alta	-107.36 dbm	-40.23 dbm
Quinto piso	-85.41 dbm	-41.11 dbm
Planta baja	-100.21 dbm	-37.26 dbm

Tabla 10: Niveles de potencia máximo y mínimo por piso

Con estos datos de potencia se usa un algoritmo para verificar la disponibilidad de los canales que se muestran en la siguiente figura conociendo la sensibilidad del equipo receptor que en los capítulos anteriores se mencionaba era de -90dbm [12].

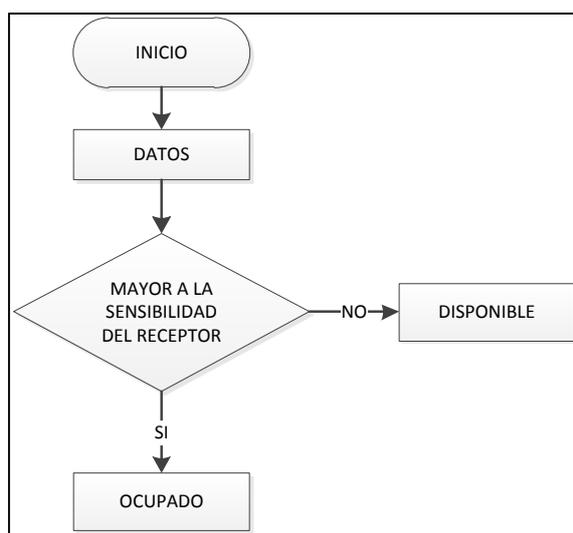


Figura 3.4 Algoritmo de disponibilidad de canal

En caso de que el canal esté disponible se le dará un valor de cero, caso contrario se le dará el valor de uno.

Una vez con la matriz de ceros y unos, se ve la probabilidad de disponibilidad en un cierto tiempo de cada uno de los canales sacando el promedio cada trece valores, este valor estará entre cero y uno, siendo más cercano a uno como menos disponible y más cercano a cero como más disponible.

Con los valores de probabilidad de disponibilidad a lo largo del tiempo, se grafica en el software Easyfit la probabilidad acumulada de la distribución de cada canal y se ajusta a tres modelos estadísticos conocidos que más se asemejen al comportamiento de los canales de la banda FM.

Los datos analizados con los modelos estadísticos se corroboran con la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (KS).

La matriz de ceros y unos de cada uno de los canales FM que se dispone anteriormente se los ordena en el tiempo, para sacar el número total de canales disponibles respectivamente en cada intervalo, este valor tendrá un valor de noventa y siete como máximo en caso de que todos los canales de la banda FM en ese instante estén disponibles o un valor de cero como mínimo en caso de no haber ningún canal disponible en ese instante. Estos nuevos valores que guardarán en una nueva tabla que permite analizar la probabilidad del número de canales por piso disponible.

## CAPÍTULO 4

### 4.1 Descripción del escenario de estudio

Las coordenadas del edificio donde se realizó las mediciones tienen una longitud de -2.196520 y latitud de -79.885029. Además en los alrededores cuenta con una elevada cantidad de edificios altos

En la figura 4.1 se muestra la estructura del edificio así como también se puede apreciar la cantidad de pisos que posee que es de una cantidad 12 pisos.

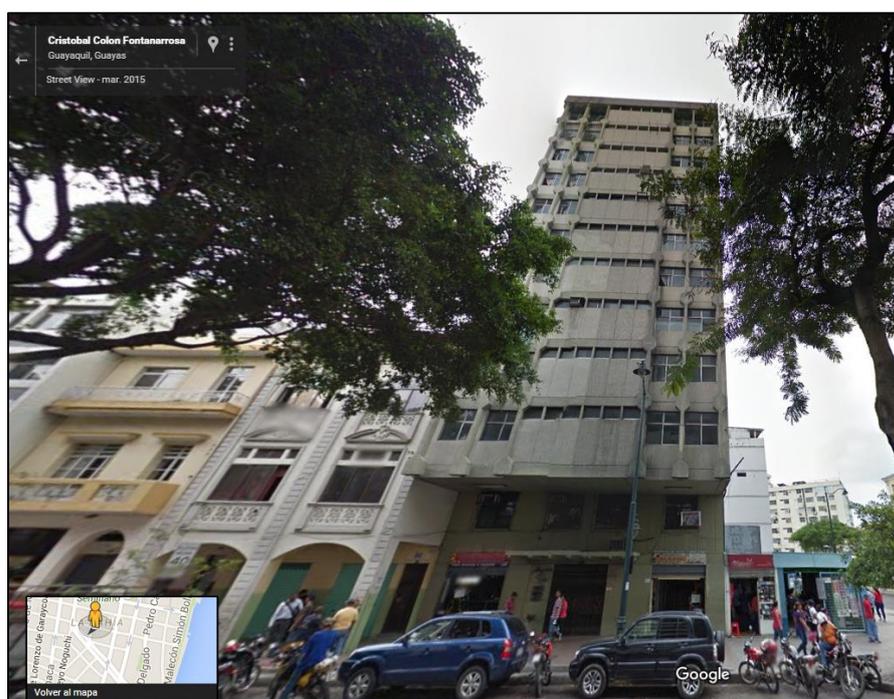


Figura 4.1: Edificio Pegar

En la figura 4.2 se muestra las calles y la ciudad, en donde se localiza el edificio y las coordenadas del mismo.

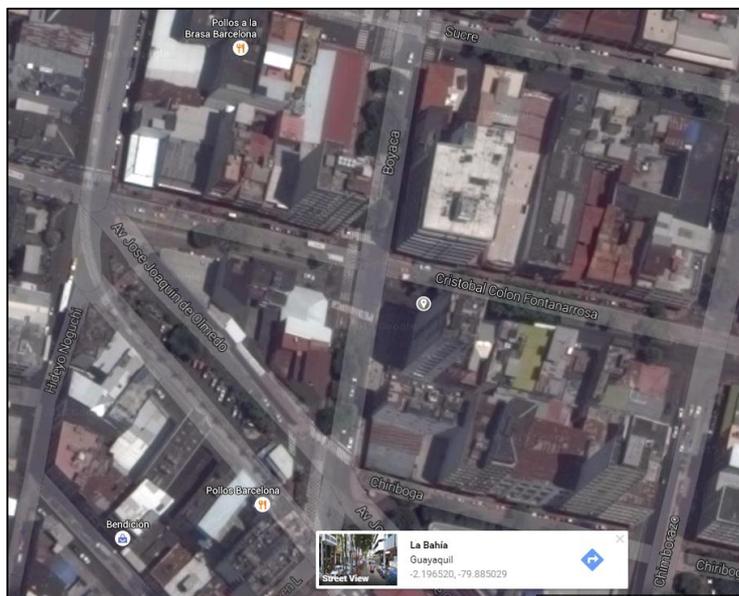


Figura 4.2: Ubicación del edificio Pegar

Se quiere ver el comportamiento de la señal FM en un edificio alto porque se desea analizar la variación de propagación de la señal en pisos estratégicos que son la planta alta, el quinto piso y la planta baja. Se puede predecir que siempre en la planta baja habrá una mayor oportunidad de acceso debido a la altura en la que se encuentra ya que no cuenta con la pérdida que provocan los pisos de concreto.

Como en una propagación FM se necesita de línea de vista, así como en otros servicios inalámbricos, los dos principales sitios que se ubican las mayorías de antenas transmisoras en la ciudad de Guayaquil por su capacidad de área de cobertura son en cerro Azul y cerro del Carmen.

El cerro Azul tiene más de 300 metros de altura, es el de mayor elevación en la ciudad de Guayaquil y se ubica en vía a la costa, mientras que el cerro del Carmen tiene una altura en el este de 200 hasta 300 metros y al oeste de 500 metros, está localizado en la zona este de la ciudad de Guayaquil.

En la figura 4.3 se puede apreciar la distancia entre el edificio donde se realizó las mediciones y cerro Azul que es de 16.33 kilómetros aproximadamente.



Figura 4.3: Distancia entre cerro azul y edificio Pegar

En la figura 3.4 se muestra el trayecto directo entre Cerro del Carmen y el edificio Pegar cuya longitud tiene una aproximación de 1.72 kilómetros.

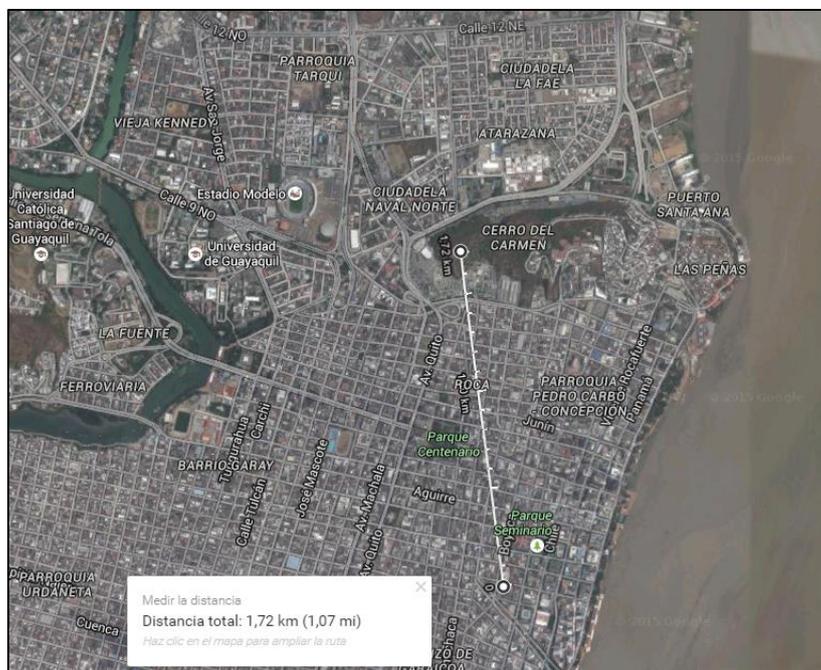


Figura 4.4: Distancia entre cerro del Carmen y edificio Pegar

## 4.2 Funciones estadísticas

**Distribución Gumbel.-** Es una distribución que sirve para el modelamiento máximos y mínimos para valores de los extremos, es usada para predecir desastres naturales y es de utilidad si su distribución es exponencial o normal. Los parámetros de esta distribución son la media ( $\mu$ ) y la varianza ( $\sigma$ )

Donde su varianza es un valor que tiene que ser mayor a cero y su media es un parámetro continuo de localización.

La ecuación de la función de densidad de probabilidad Gumbel Min es:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp(z - \exp(z)) \quad (4.1)$$

La ecuación de la función de distribución acumulada de Gumbel Min es:

$$F(x) = 1 - \exp(-\exp(z)) \quad (4.2)$$

La relación del parámetro Z con la media de la función es:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4.3)$$

En la figura 4.5 se puede observar la densidad de probabilidad de la función Gumbel Min con una media de cero y una varianza de 1.

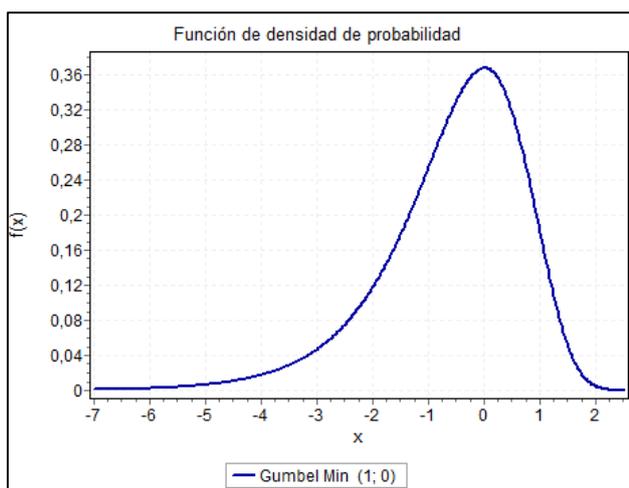


Figura 4.5: Función de densidad de probabilidad Gumbel Min

La distribución acumulativa de la función Gumbel Min se puede apreciar en la figura 4.6 con una media de cero y una varianza de uno.

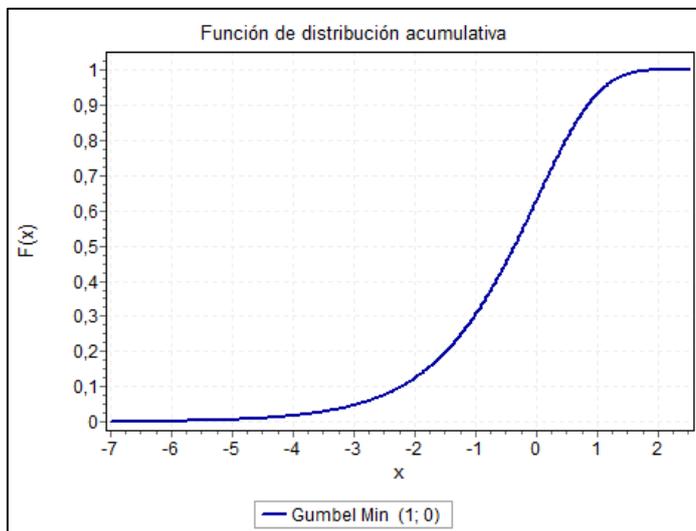


Figura 4.6: Función de distribución acumulativa Gumbel Min

**Distribución Log-Logistic.-** Conocida como distribución Fisk para la economía, es una distribución continua para variables que no sean negativas, es usado para modelos que se incrementan inicialmente y luego se decrementan, como en el caso de estudio del fluido de agua en precipitación, es usado para distribuciones aleatorias. Los parámetros para la distribución Log-Logistic es alfa, beta y gamma.

La ecuación de la densidad de probabilidad de la función Log-Logistic es:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{x-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} \left( 1 + \left( \frac{x-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha} \right)^{-2} \quad (4.4)$$

La ecuación de la distribución acumulada de la función Log-Logistic es:

$$F(x) = \left( 1 + \left( \frac{\beta}{x-\gamma} \right)^{\alpha} \right)^{-1} \quad (4.5)$$

En la figura 4.7 se puede observar la densidad de probabilidad de la función Log-Logistic con un valor alfa de tres, un beta de 1 y un gamma de 0.

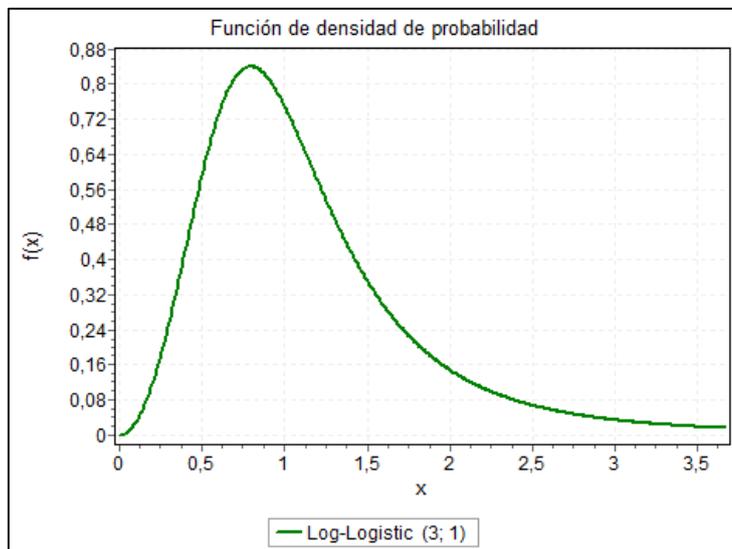


Figura 4.7: Función de densidad de probabilidad Log-Logistic

En la figura 4.8 se puede observar la distribución acumulativa de la función Log-Logistic con un valor alfa de tres, un beta de 1 y un gamma de 0.

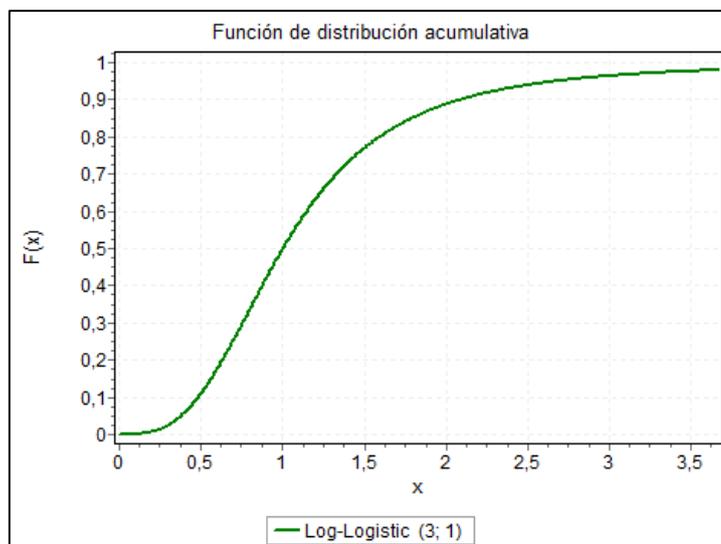


Figura 4.8: Función de distribución acumulativa Log-Logistic

**Distribución error.-** Conocido también como distribución de poder exponencial, forma parte de las distribuciones sistemáticas. Los parámetros en esta función son  $K$  que se le dio un valor de 3, a  $\sigma$  un valor de 1 y a  $\mu$  un valor de 0.

La ecuación de densidad de probabilidad de la función Error es:

$$f(x) = C_1 \sigma^{-1} (-|C_0 Z|^k) \quad (4.6)$$

La ecuación de la distribución acumulada de la función Error es:

$$F(X) = \begin{cases} 0.5 \left( 1 + \frac{\gamma |C_0 Z|^{k(1/k)}}{\gamma^{(1/k)}} \right) & x \geq \mu \\ 0.5 \left( 1 - \frac{\gamma |C_0 Z|^{k(1/k)}}{\gamma^{(1/k)}} \right) & x < \mu \end{cases} \quad (4.7)$$

La relación de  $C_0$  y  $C_1$  se observa en la ecuación 4.8 y 4.9 respectivamente:

$$C_0 = \left( \frac{\gamma^{(3/k)}}{\gamma^{(1/k)}} \right)^{1/2} \quad (4.8)$$

$$C_1 = \frac{k C_0}{2 \gamma^{(1/k)}} \quad (4.9)$$

La relación del parámetro  $Z$  es:

$$Z \equiv \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4.10)$$

En la figura 4.9 se puede apreciar la densidad de probabilidad de la función Error.

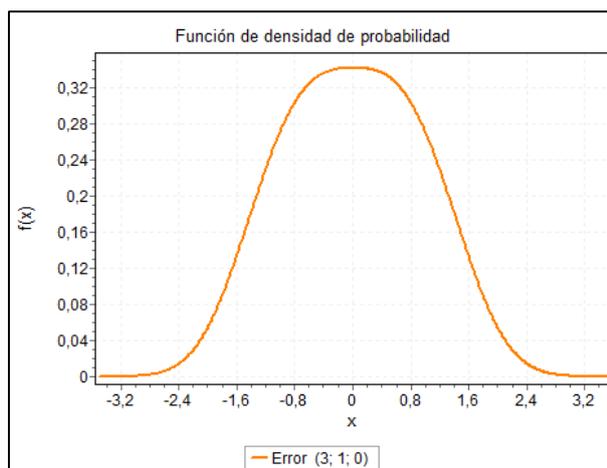


Figura 4.9: Función de densidad de probabilidad Error

En la figura 4.10 se observa la función de distribución acumulativa de la función Error.

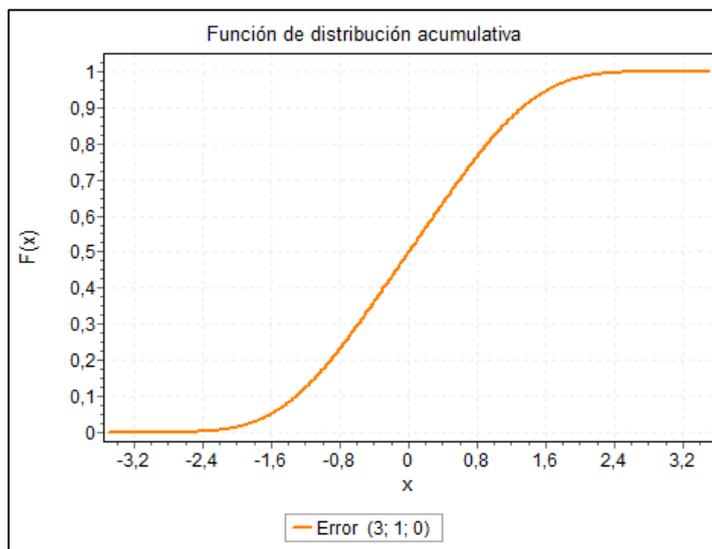


Figura 4.10: Función de distribución acumulativa

**Distribución Laplace.-** Es un distribución de probabilidad continua también es conocida como distribución doble exponencial, cuenta con una gran similitud con la distribución exponencial pero se le añade un nuevo parámetro de localización, normalmente se la utiliza para modelamientos de reconocimiento de voz y para compresiones de imágenes tipo JPEG. Los parámetros son lambda

La ecuación de la densidad de probabilidad de la función Laplace es:

$$f(x) = \frac{\lambda}{2} \exp(-\lambda|x - \mu|) \quad (4.11)$$

La ecuación de la función de distribución acumulada de la función Laplace es:

$$F(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \exp(-\lambda(\mu - x)) & x \leq \mu \\ 1 - \frac{1}{2} \exp(-\lambda(\mu - x)) & x > \mu \end{cases} \quad (4.12)$$

En la figura 4.11 se puede observar la densidad de probabilidad de la función Laplace con un valor lambda de 1 y  $\mu$  de 0.

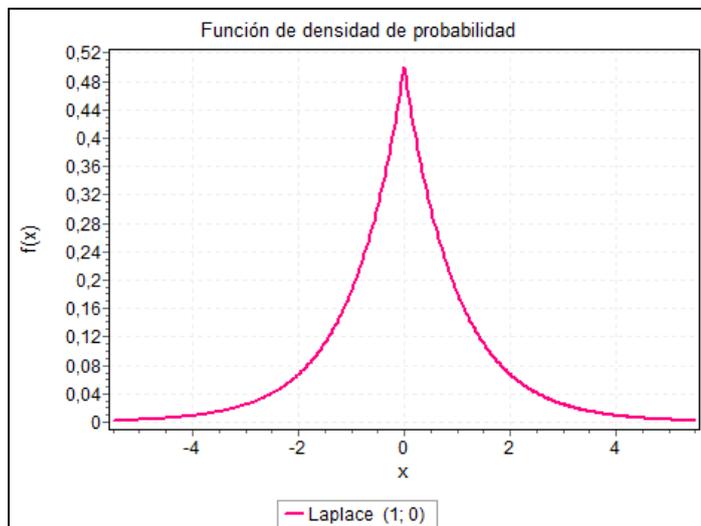


Figura 4.11: Función de densidad de probabilidad Laplace

En la figura 4.12 se puede observar la función de distribución acumulativa de la función Laplace con un valor lambda de 1 y  $\mu$  de 0.

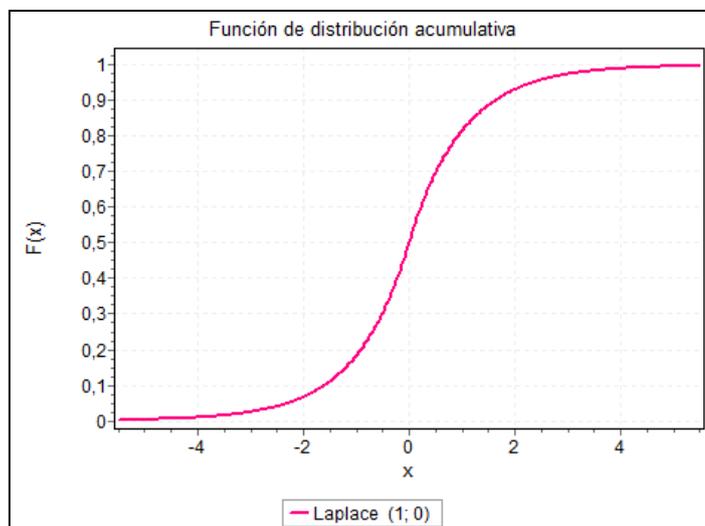


Figura 4.12: Función de distribución acumulativa Laplace

#### 4.1 Gráficos de potencias

En la figura 4.13 y 4.14 se puede apreciar los niveles de potencia en la planta alta del edificio que van desde el canal 88.1 MHz hasta 97.9 MHz y 98.1 MHz hasta 107.3 MHz respectivamente, los colores rojizos están alrededor de -50dbm y los colores turquesas alrededor de los -80dbm, se tiene como dato que la sensibilidad de recepción FM es de -90dbm por lo que se ve que los canales FM está totalmente ocupados en ese intervalo de tiempo [12].

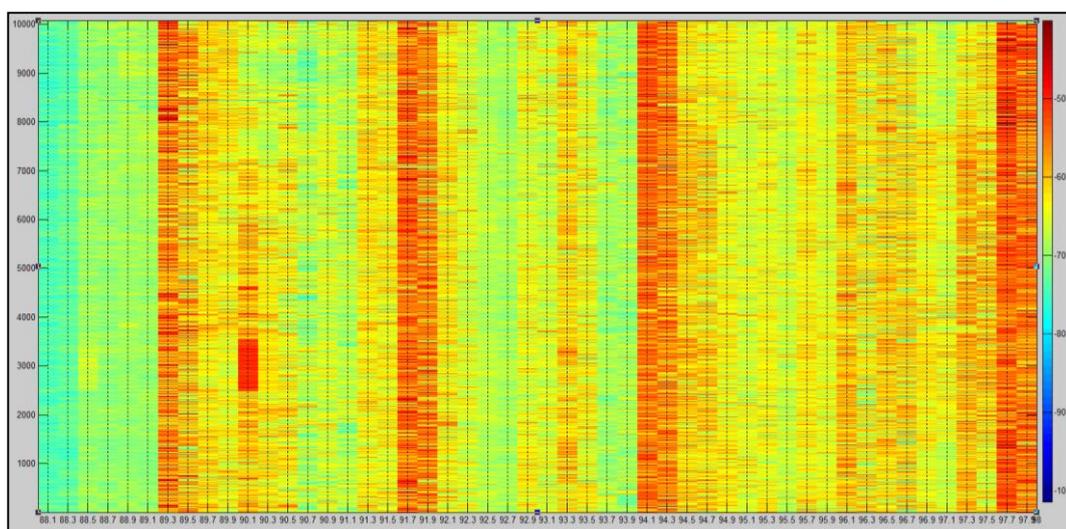
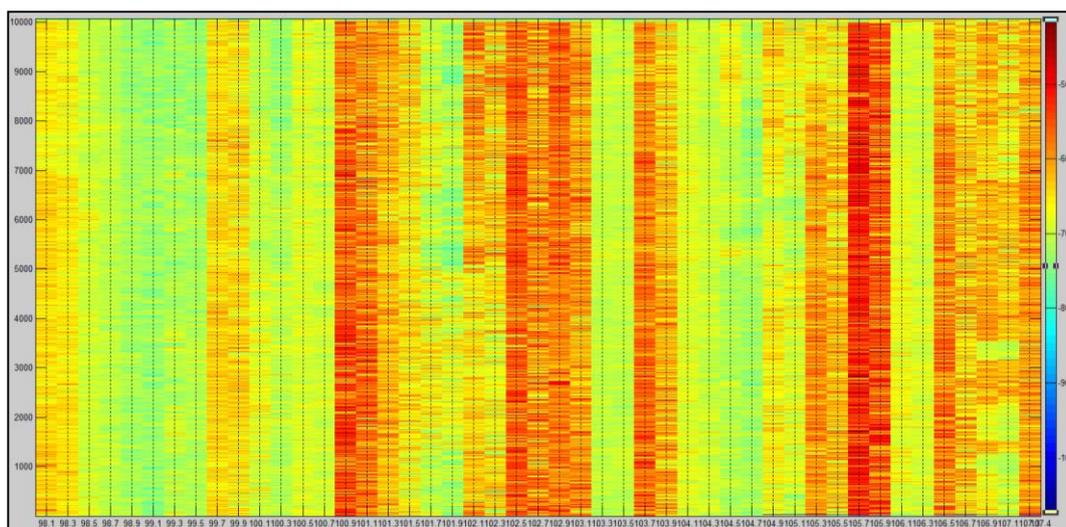


Figura 4.13: Potencias para frecuencias de 88.1 MHz hasta 97.9 MHz



Figuras 4.14: Potencias para frecuencias de 98.1 MHz hasta 107.3 MHz

Las figuras 4.15 y 4.16 se puede observar que en la planta media del edificio los canales poseen un nivel de potencia mayor al umbral de -90dbm, también donde se puede observar un valores más bajos de potencia en comparación con el piso de la planta alta debido a la pérdida causada por las losas del edificio en la parte superior [12].

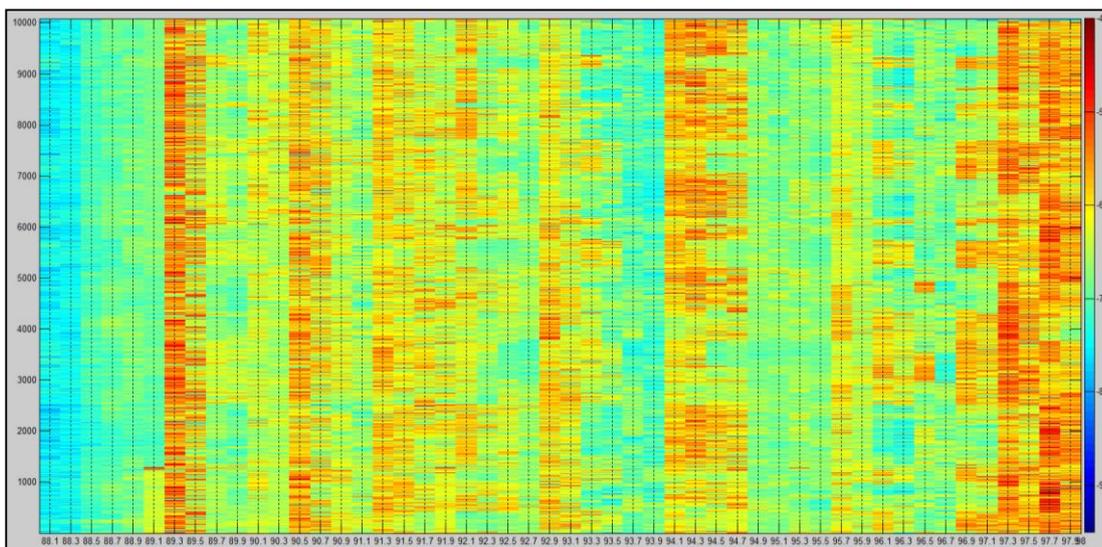


Figura 4.15: Potencias para frecuencias de 88.1 MHz hasta 97.9 MHz

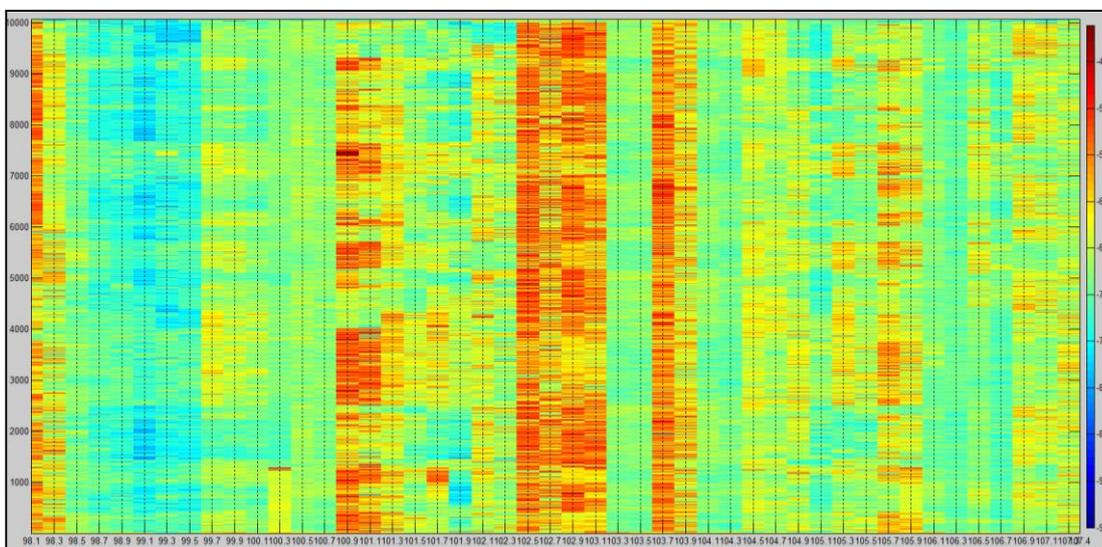


Figura 4.16: Potencias para frecuencias de 98.1 MHz hasta 107.3 MHz

Como se muestra en las figuras 4.17 y 4.18, el muestreo de banda en la planta baja del edificio, muestra mayor pérdida de la señal, por lo que se notan pequeños espacios donde el nivel de potencia está por debajo de los -90dbm, sin embargo esto ocurre para ciertos canales de esta banda y en poco tiempo, mientras en la mayoría de ellos su nivel no es inferior al del umbral [12].

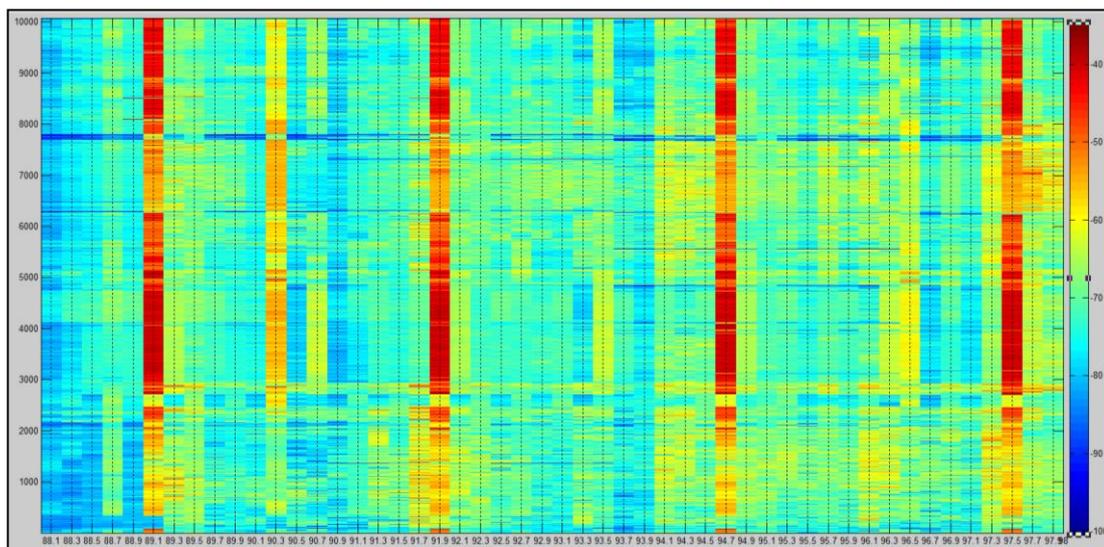


Figura 4.17: Potencias para frecuencias de 88.1 MHz hasta 97.9 MHz

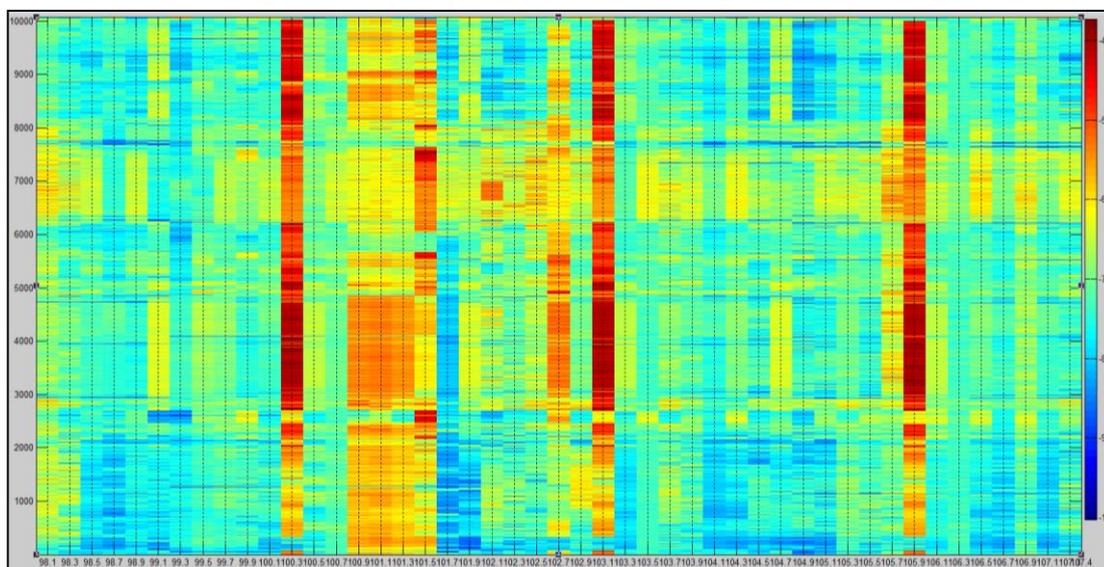


Figura 4.18: Potencias para frecuencias de 98.1 MHz hasta 107.3 MHz

## 4.2 Gráficos de disponibilidad

La disponibilidad de canal se observa si el nivel de potencia no sobrepasa el umbral de sensibilidad dándole un valor de 0, caso contrario se le da un valor de 1, como se mencionó anteriormente la sensibilidad de recepción de un sistema FM es de -90dbm.

Se observa en la figura 4.19 la disponibilidad de los canales FM de la planta alta, donde el rojo representa canal ocupado y las tonalidades azules para libre, todos los canales de radio analizados en la planta alta se encuentran ocupados en el tiempo por lo que impide un análisis de algún tipo de modelamiento estadístico del canal.

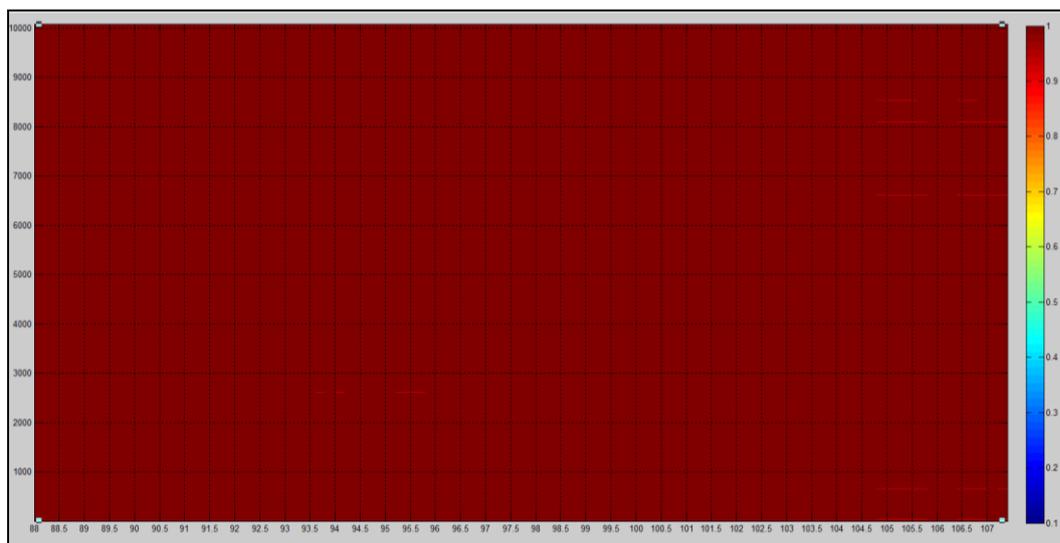


Figura 4.19: Disponibilidad de los canales desde 88.1 MHz hasta 107.3 MHz en planta alta

La figura 4.20 muestra el análisis de disponibilidad en la planta media de la edificación y al igual que en la planta alta se puede concluir que hay una ocupación máxima para todos los canales.

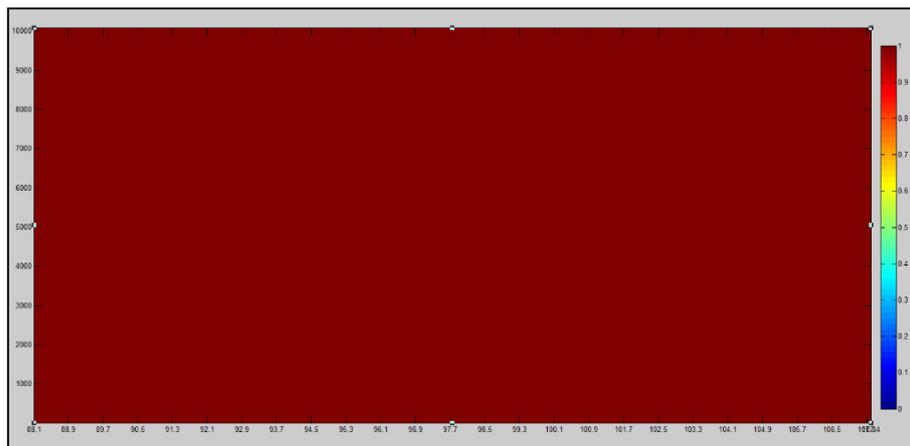


Figura 4.20: Disponibilidad de los canales desde 88.1 MHz hasta 107.3 MHz en planta media

En la figura 4.21 se observa la disponibilidad de los canales que van desde los 88.1 MHz hasta 107.3 MHz de la planta baja de la edificación, la disponibilidad es un poco mayor que los otros pisos sin embargo la mayor parte del tiempo la mayoría de canales permanecen ocupados por su señal FM.

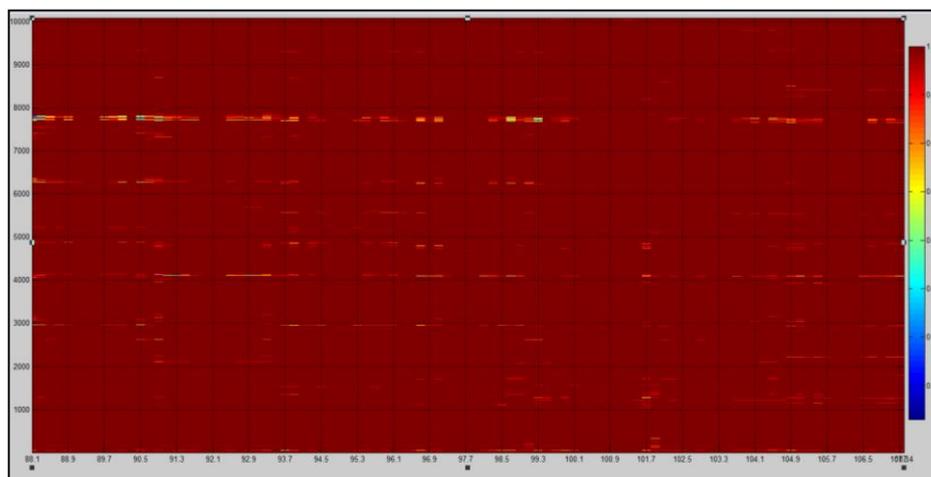


Figura 4.21: Disponibilidad de los canales desde 88.1 MHz hasta 107.3 MHz de la planta baja

En la planta baja de la edificación, el rango de 88.1 MHz a 92.9 MHz se puede observar detenidamente el comportamiento de cada canal para cada rango de

tiempo en las figuras 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, donde el canal más disponible de este rango es el 90.5 MHz.

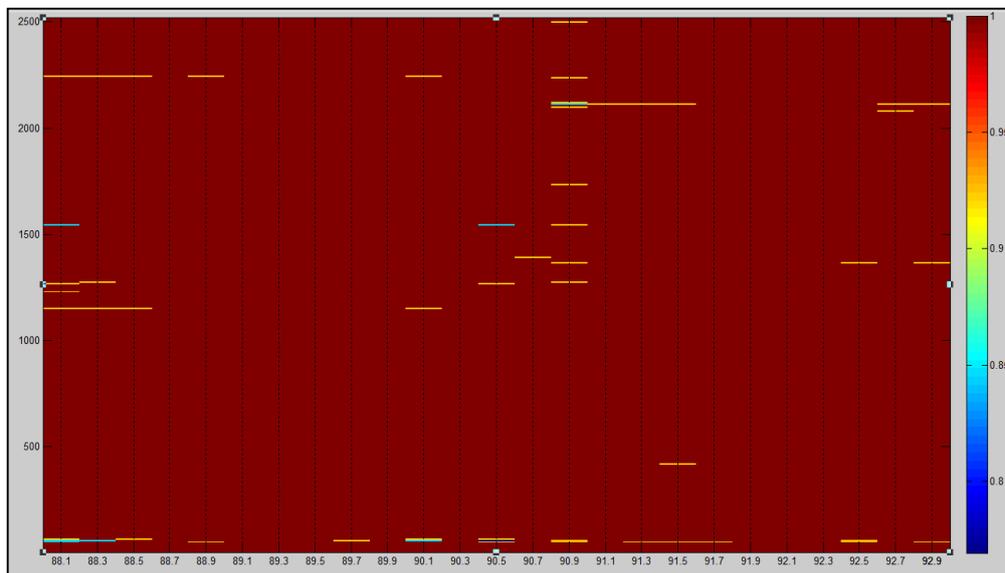


Figura 4.22: Disponibilidad de los canales desde 88.1 MHz hasta 92.9 MHz desde de 0 a 2500 minutos.

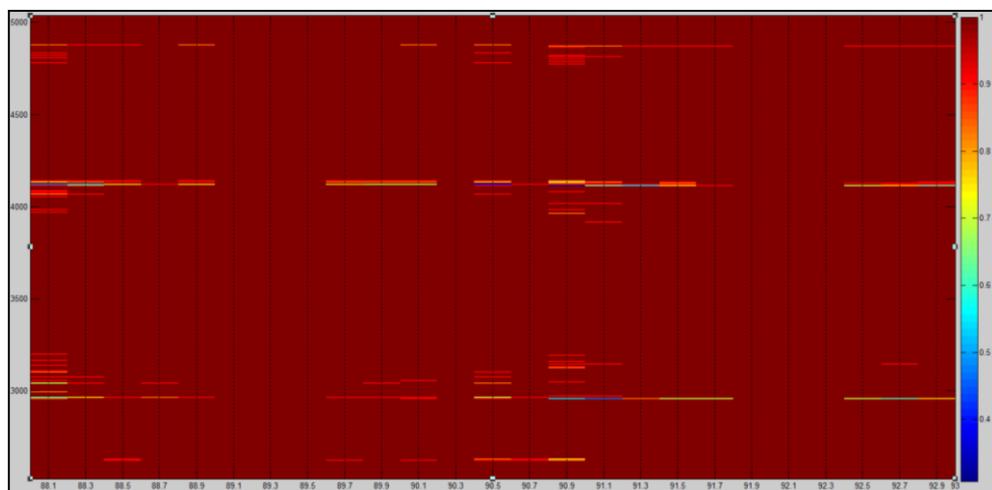


Figura 4.23: Disponibilidad de los canales desde 88.1 MHz hasta 92.9 MHz de 2500 a 5000 minutos

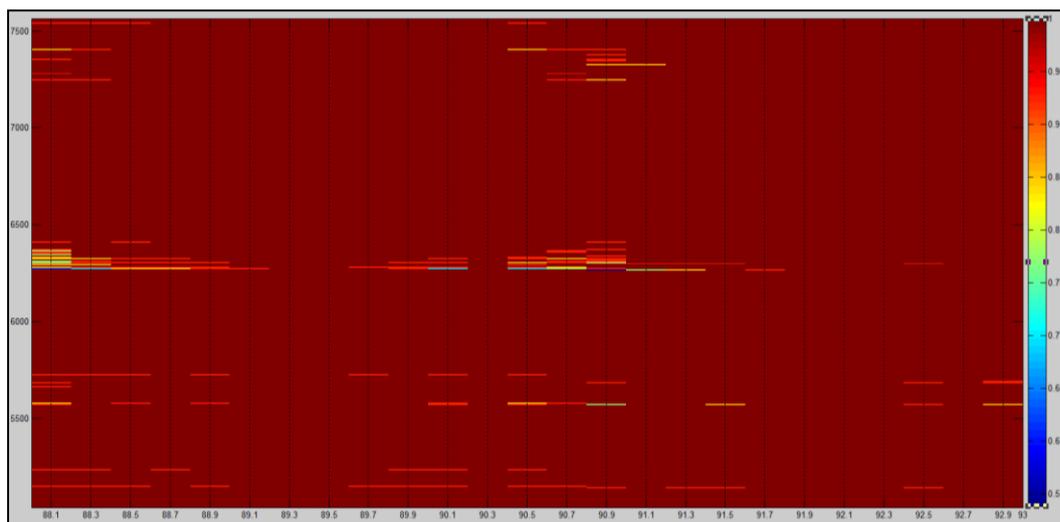


Figura 4.24: Disponibilidad de los canales desde 88.1 MHz hasta 92.9 MHz de 5000 a 7500 minutos.

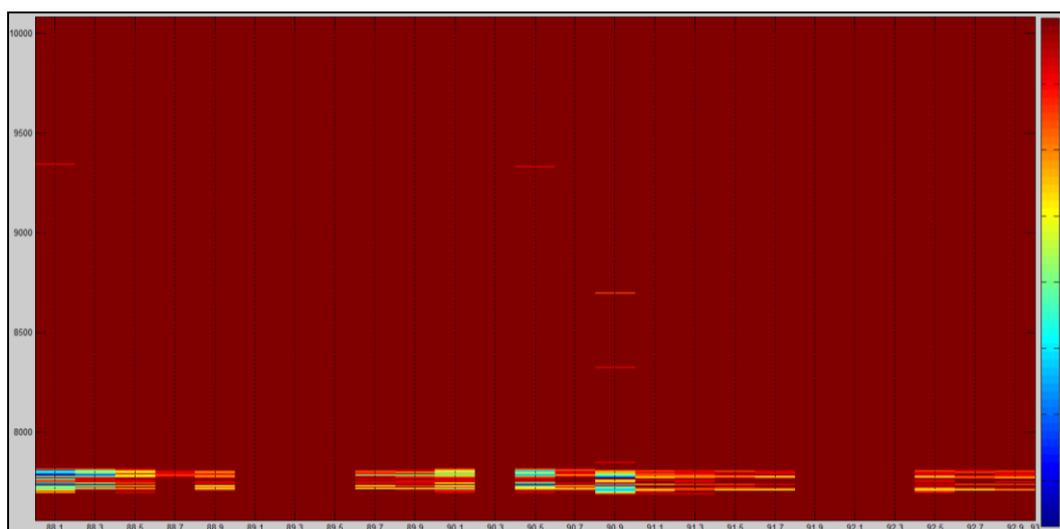


Figura 4.25: Disponibilidad de los canales desde 88.1 MHz hasta 92.9 MHz de 7500 a 10000 minutos

En la figura 4.26 se puede observar los parámetros de las diferentes funciones estadísticas con las que se modeló estadísticamente el comportamiento del canal 90.5 MHz.

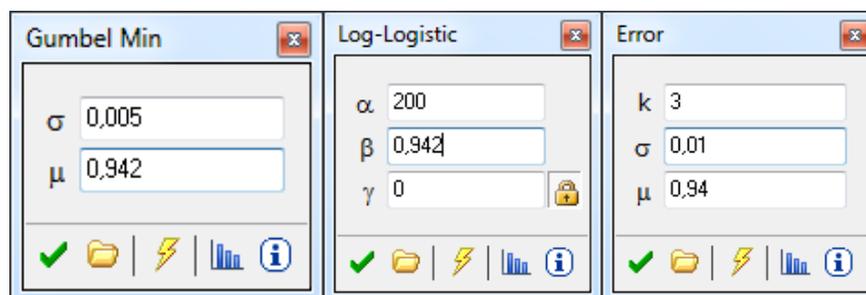


Figura 4.26: Funciones Estadísticas utilizadas para la aproximación de la muestra de disponibilidad del canal 90.5 MHz.

En la figura 4.27 se muestra el análisis Kolmogorov-Smirnov, este análisis resulta positivo a una distribución Gumbel Min con un alfa 0.05, dando una confiabilidad del 95%.

Gumbel Min [#23]					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	1541				
Estadística	0,01622				
Valor P	0,80575				
Rango	1				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	0,02733	0,03115	0,03459	0,03867	0,0415
Rechazar?	No	No	No	No	No

Figura 4.27: Cuadro de aceptación de prueba KS para la función estadística Gumbel Min con la muestra del canal 90.5 MHz.

Se puede observar en la figura 4.28 que el canal 90.5 MHz sigue el patrón de distribución estadística Log-Logistic, Error y Gumbel Min.

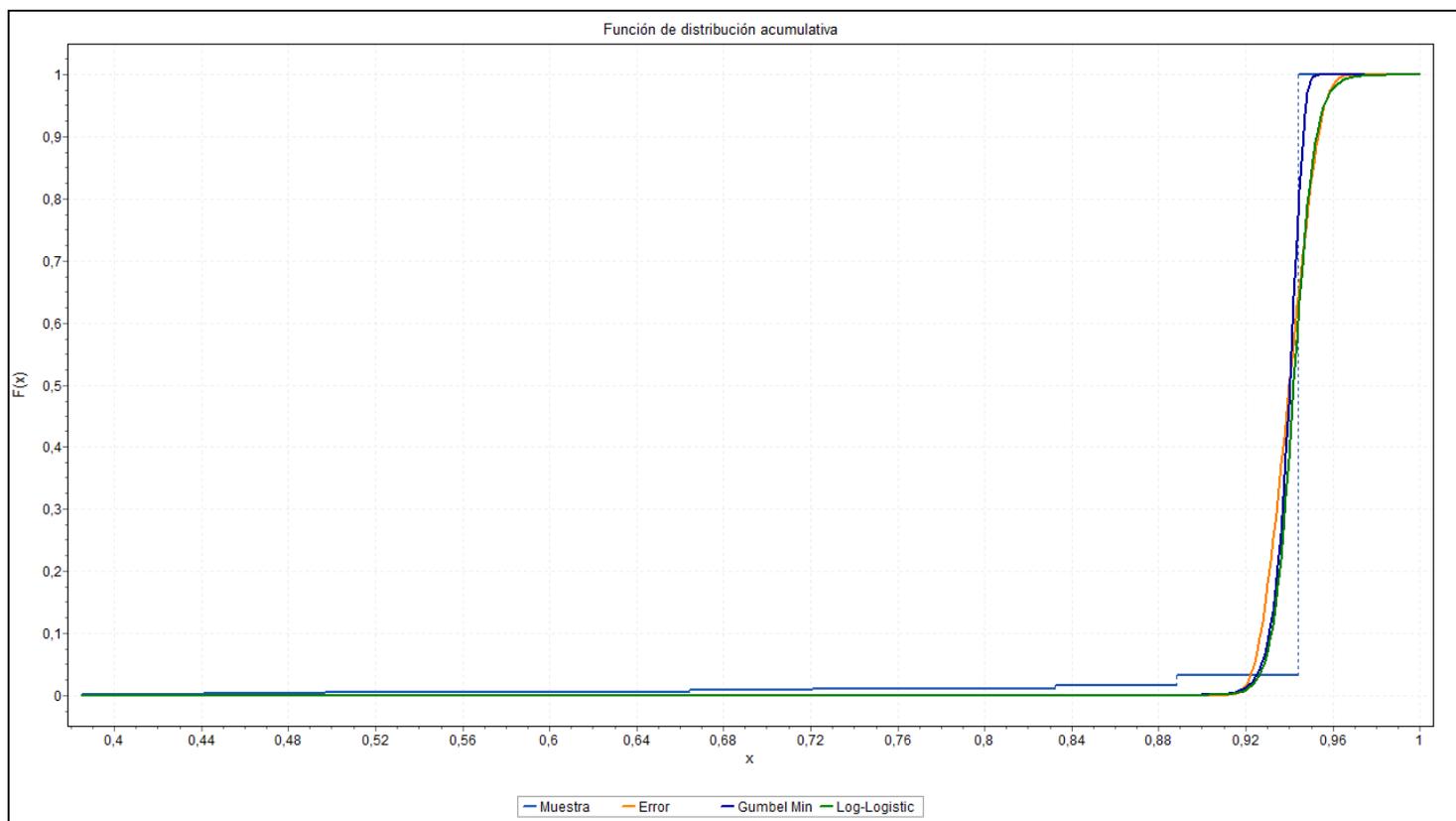


Figura 4.28: Funciones estadísticas de distribución acumulativa y muestra de disponibilidad del canal.

Para el rango de 93.1 MHz a 97.9 MHz el análisis de la disponibilidad de cada canal de las figuras 4.29, 4.30, 4.31 y 4.32 muestra una disponibilidad nula, y los canales que muestran una disponibilidad un poco mayor es el de 96.7 MHz.

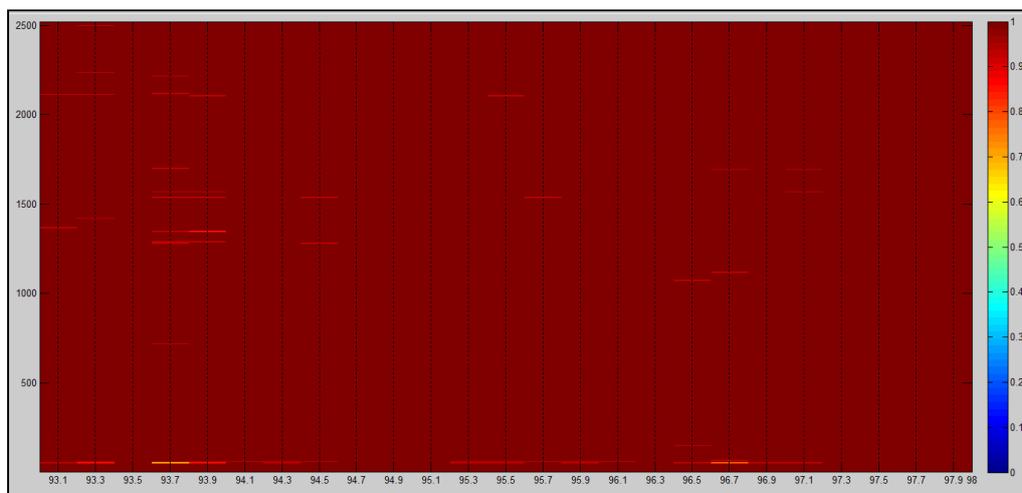


Figura 4.29: Disponibilidad de los canales desde 93.1 MHz hasta 97.9 MHz de 0 a 2500 minutos

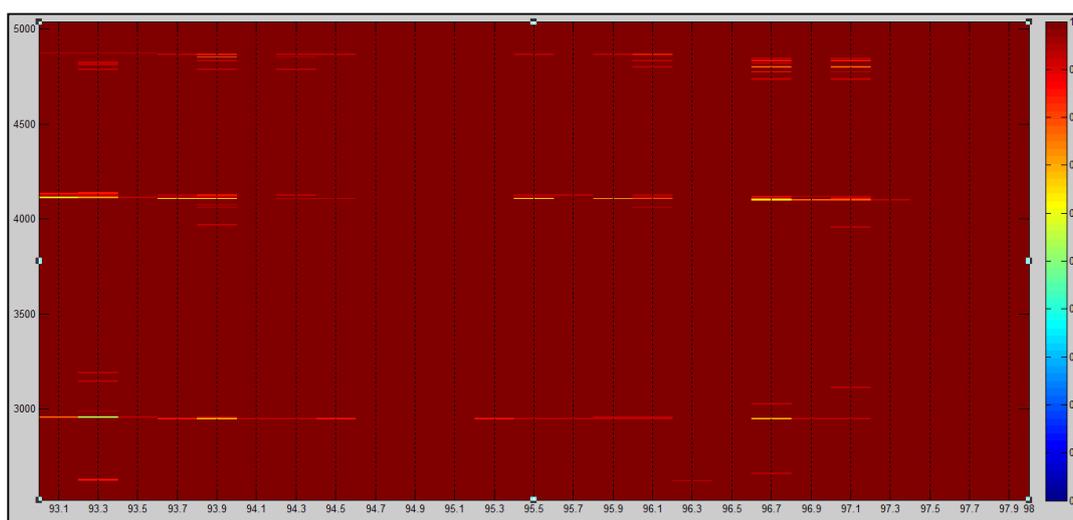


Figura 4.30: Disponibilidad de los canales desde 93.1 MHz hasta 97.9 MHz de 2500 a 5000 minutos

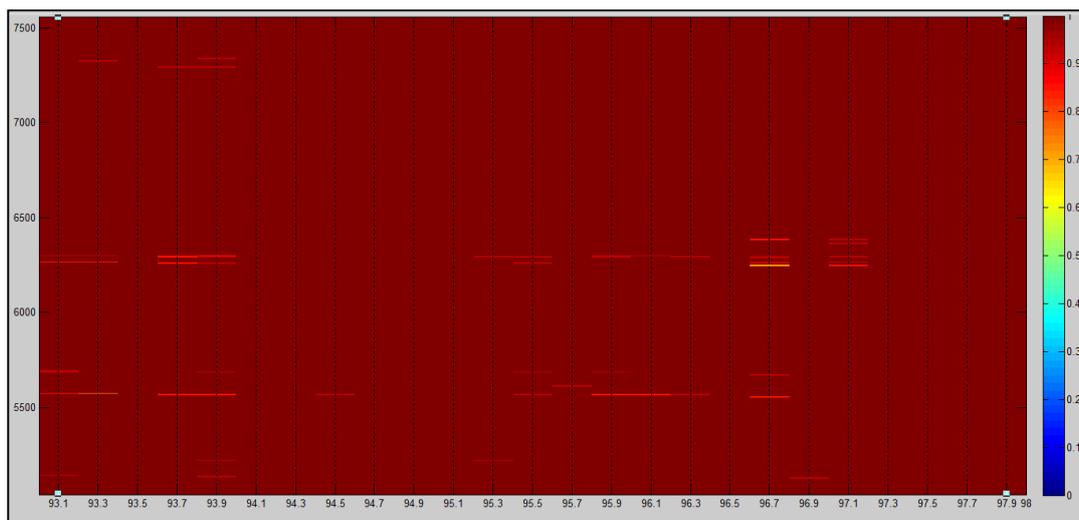


Figura 4.31: Disponibilidad de los canales desde 93.1 MHz hasta 97.9 MHz de 5000 a 7500 minutos

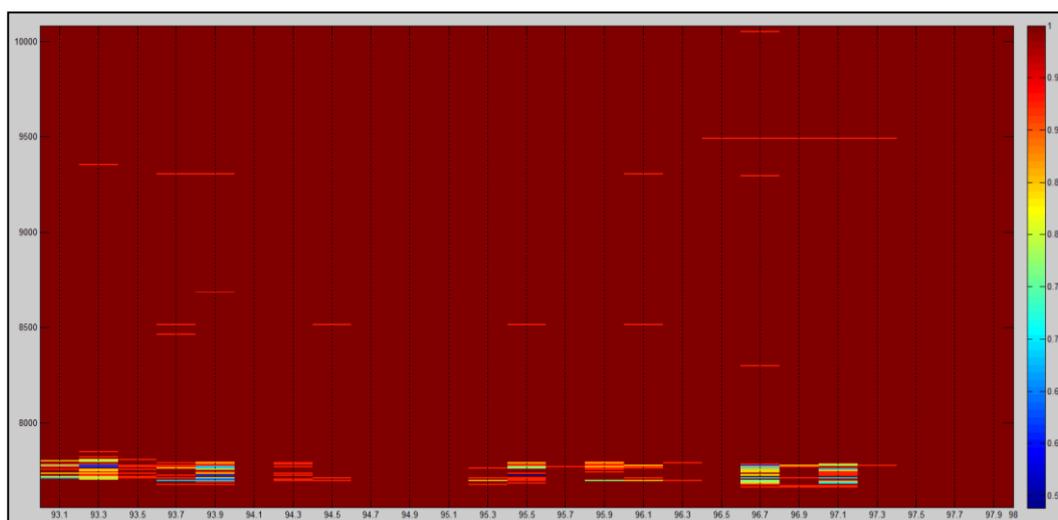


Figura 4.32: Disponibilidad de los canales desde 93.1 MHz hasta 97.9 MHz de 7500 a 10000 minutos

Como se mencionó anteriormente el canal 96.7 MHz es el que representa mayor disponibilidad en el rango de 93.1 MHz hasta 97.9 MHz, en la figura se muestra

las los parámetros de las diferentes funciones estadísticas con las que se modeló el canal.

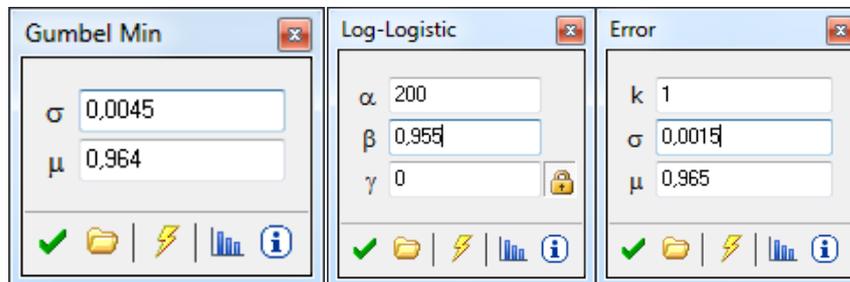


Figura 4.33: Funciones estadísticas utilizadas para la aproximación de la muestra de disponibilidad del canal 96.7 MHz

En la figura 4.34 se muestra el análisis de Kolmogorov-Smirnov, esto da a conocer que la función Gumbel Min se aproxima de mejor manera y muestra un valor aceptable para una significancia del 0.05

Gumbel Min [#23]					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	1541				
Estadística	0,02909				
Valor P	0,14446				
Rango	1				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	0,02733	0,03115	0,03459	0,03867	0,0415
Rechazar?	Sí	No	No	No	No

Figura 4.34: Cuadro de aceptación de prueba KS para la función estadística Gumbel Min con la muestra del canal 96.7 MHz.

La figura 4.35 muestra las funciones estadísticas CDF que se aproximan a la muestra de disponibilidad del canal 96.7 MHz y son: Gumbel min, Error y Log-Logistic.

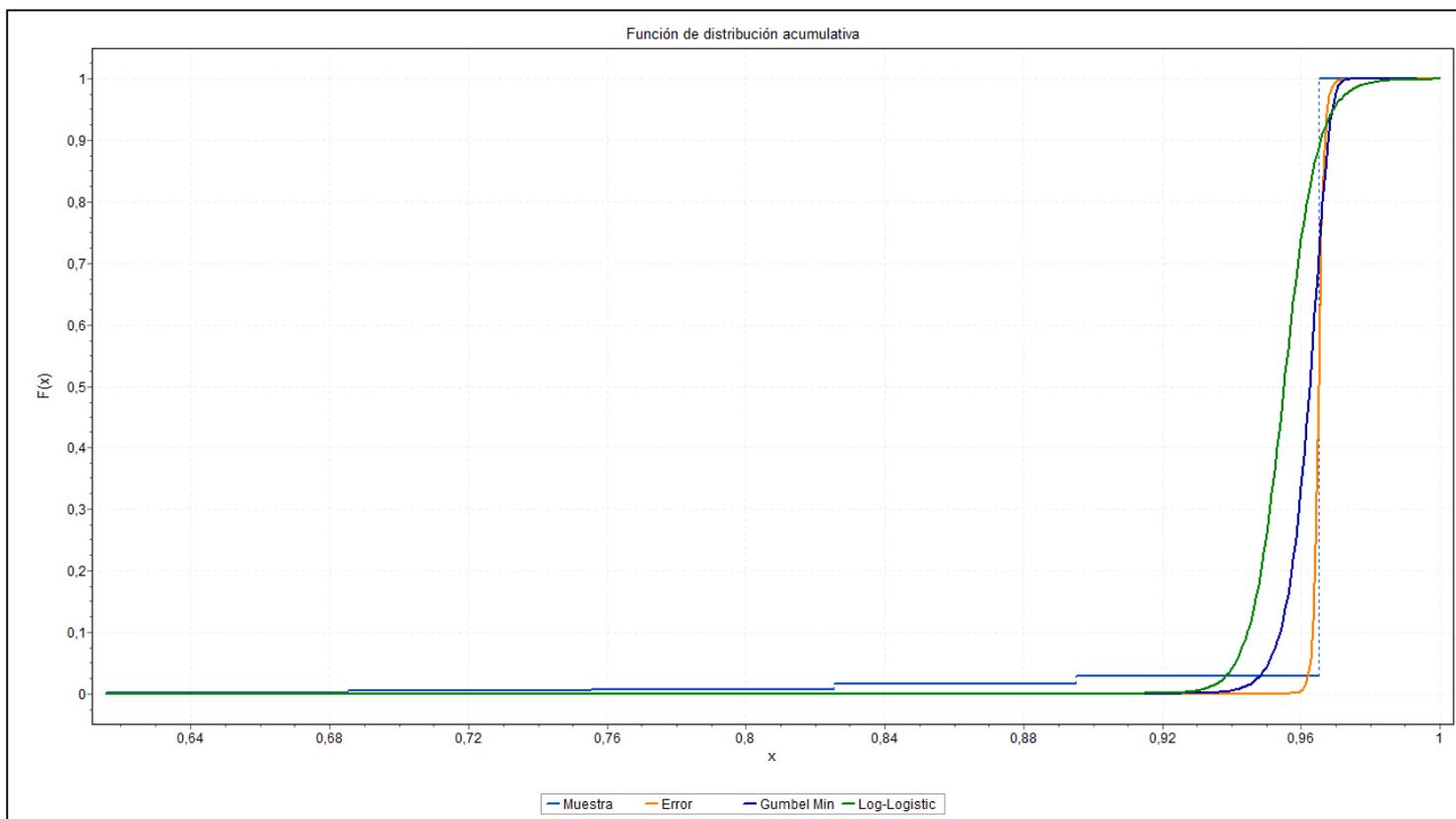


Figura 4.35: Funciones estadísticas de distribución acumulativa y muestra de la disponibilidad del canal.

En las figuras 4.36, 4.37, 4.38 y 4.39 se muestra los valores de los canales que van desde los 98.1 MHz hasta los 102.9 MHz de la planta baja, esto da a conocer un bajo grado de disponibilidad para todos los canales y de este rango el que presenta un pequeño nivel de disponibilidad es el canal de 101.7 MHz.

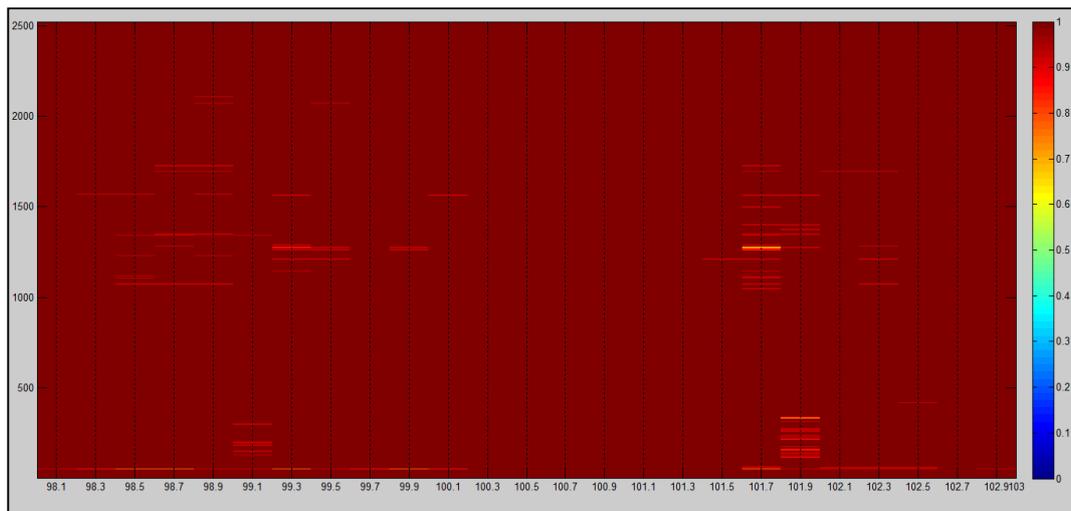


Figura 4.36: Disponibilidad de los canales desde 98.1 MHz hasta 102.9 MHz de 0 a 2500 minutos.

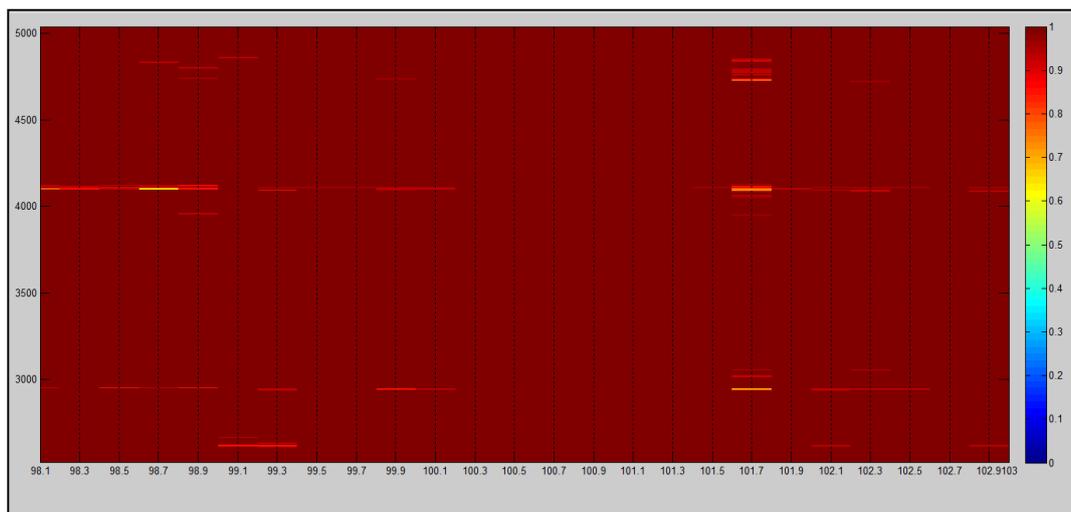


Figura 4.37 Disponibilidad de los canales desde 98.1 MHz hasta 102.9 MHz de 2500 a 5000 minutos

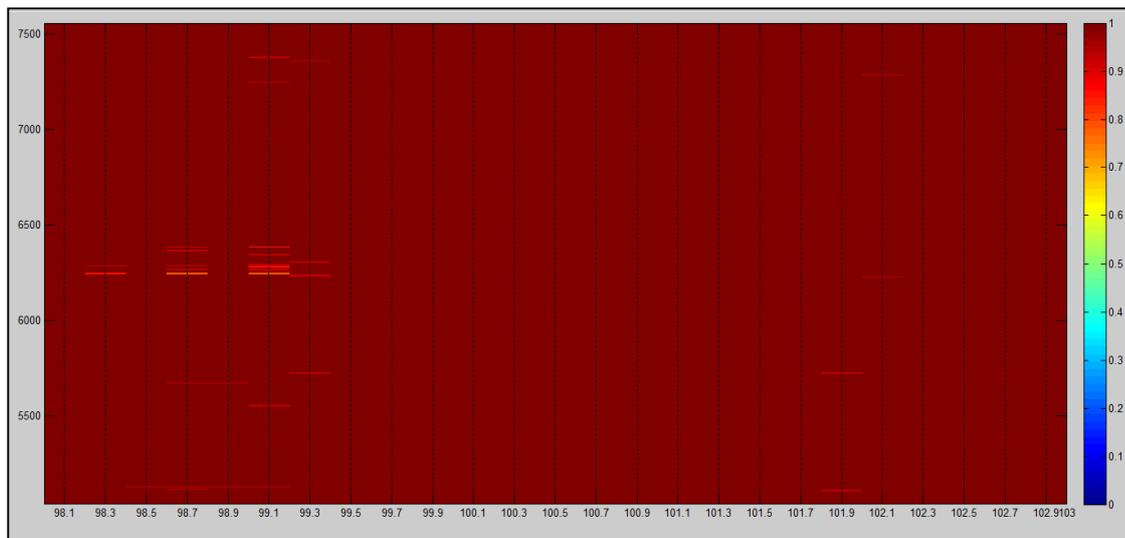


Figura 4.38: Disponibilidad de los canales desde 98.1 MHz hasta 102.9 MHz de 5000 a 7500 minutos.

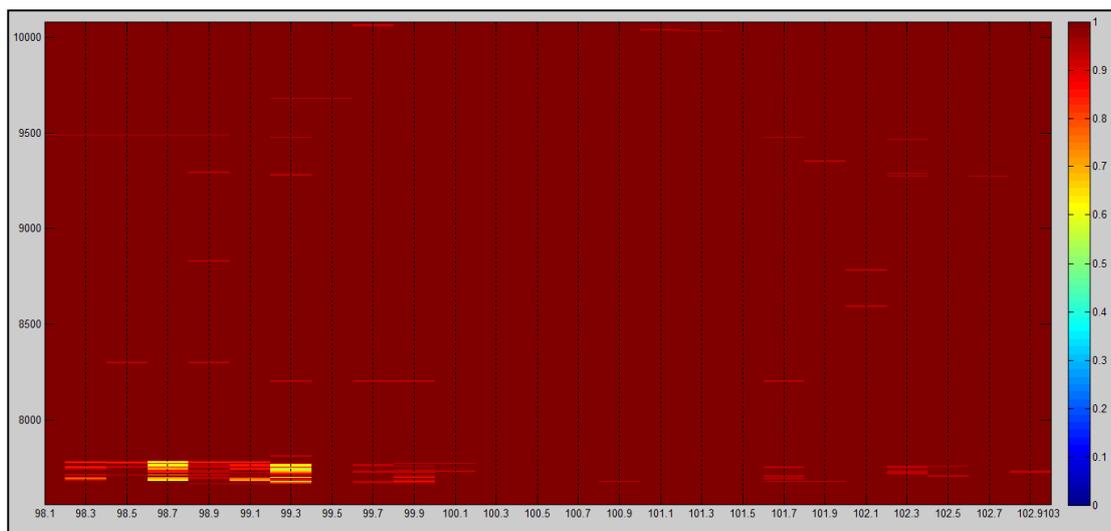


Figura 4.39: Disponibilidad de los canales desde 98.1 MHz hasta 102.9 MHz de 7500 a 10000 minutos

Los parámetros de las diferentes funciones estadísticas tal como Log-Logistic, Laplace y Gumbel Min, con las que se modeló estadísticamente el comportamiento del canal 101.7 MHz se muestran en la figura 4.40.

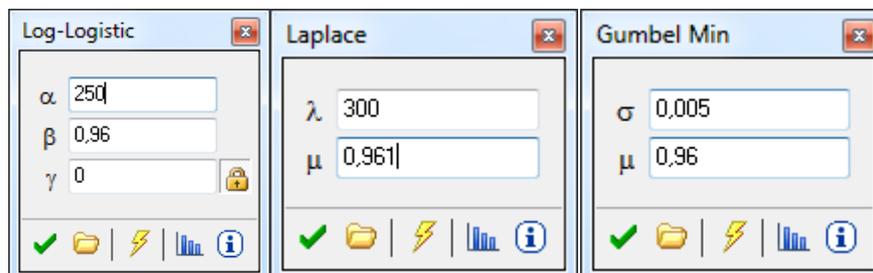


Figura 4.40: Funciones estadísticas utilizadas para la aproximación de la muestra de disponibilidad del canal 101.7 MHz.

La figura 4.41 muestra el análisis de Kolmogorov-Smirnov, esto da a conocer que la función Gumbel Min se aproxima de mejor manera y muestra un valor aceptable para una significancia del 0.05.

Gumbel Min [#23]					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	1541				
Estadística	0,03183				
Valor P	0,08628				
Rango	1				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	0,02733	0,03115	0,03459	0,03867	0,0415
Rechazar?	Sí	Sí	No	No	No

Figura 4.41: Cuadro de aceptación de prueba KS para la función estadística Gumbel Min con la muestra del canal 101.7 MHz.

En la figura 4.42 se puede observar las distribuciones estadísticas, más cercanas al CDF del canal 101.7 MHz, que son Gumbel Min, Laplace y Log-logistic, donde la bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov acepta a la función Gumbel Min con significancia de 0.05.

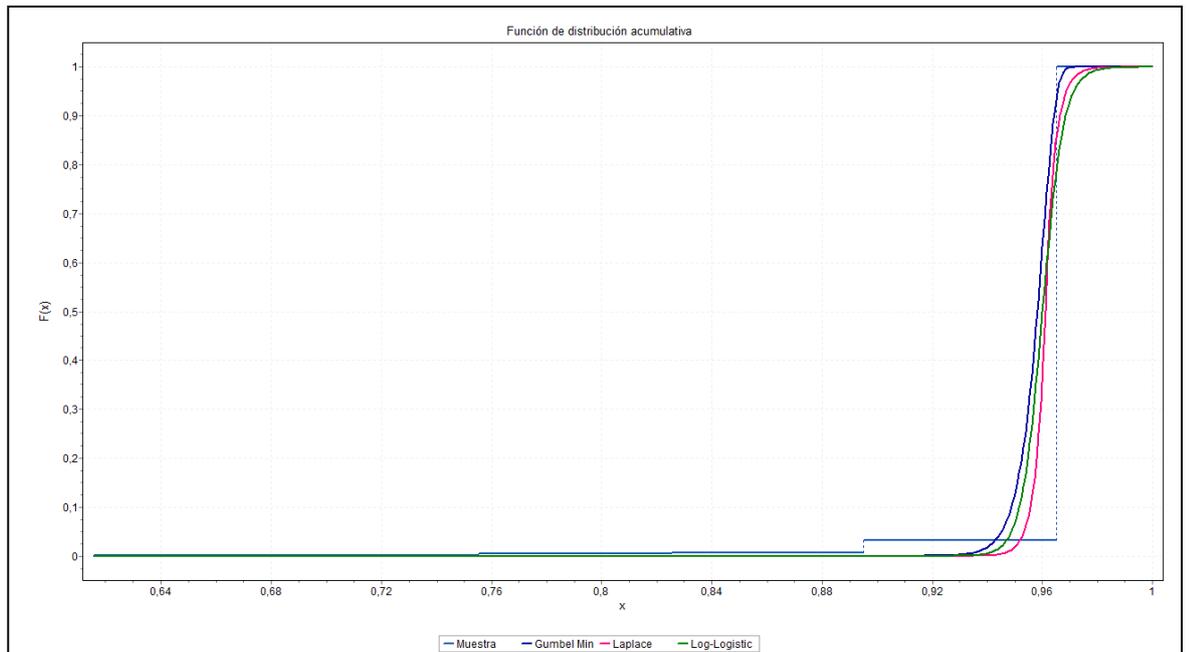


Figura 4.42: Funciones estadísticas de distribución acumulativa y muestra de la disponibilidad del canal

La figura 4.43, 4.44, 4.45 y 4.46 muestra la disponibilidad de los canales FM que van desde los 103.1 MHz hasta los 107.3 MHz a través del tiempo.

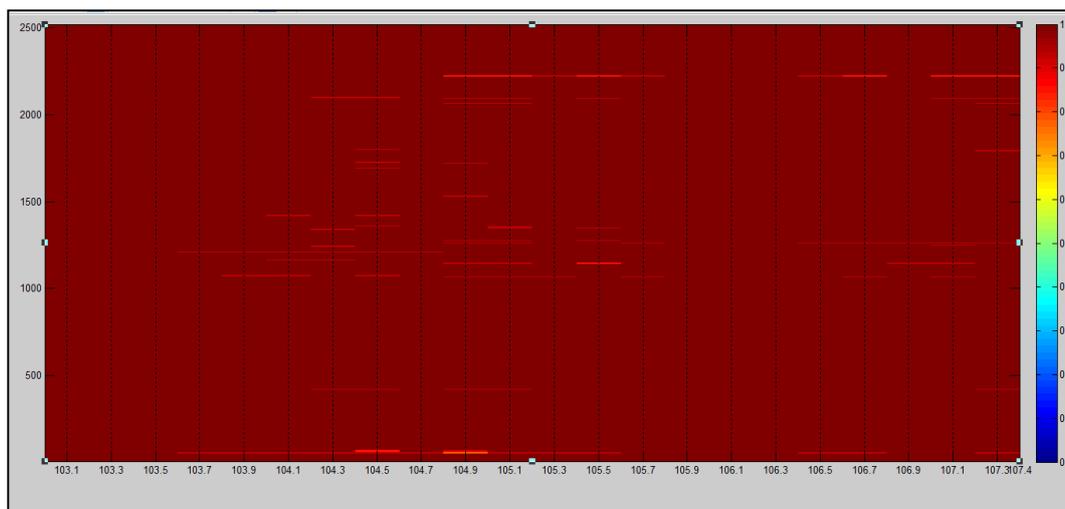


Figura 4.43: Disponibilidad de los canales desde 103.1 MHz hasta 107.3 MHz de 0 a 2500 minutos.

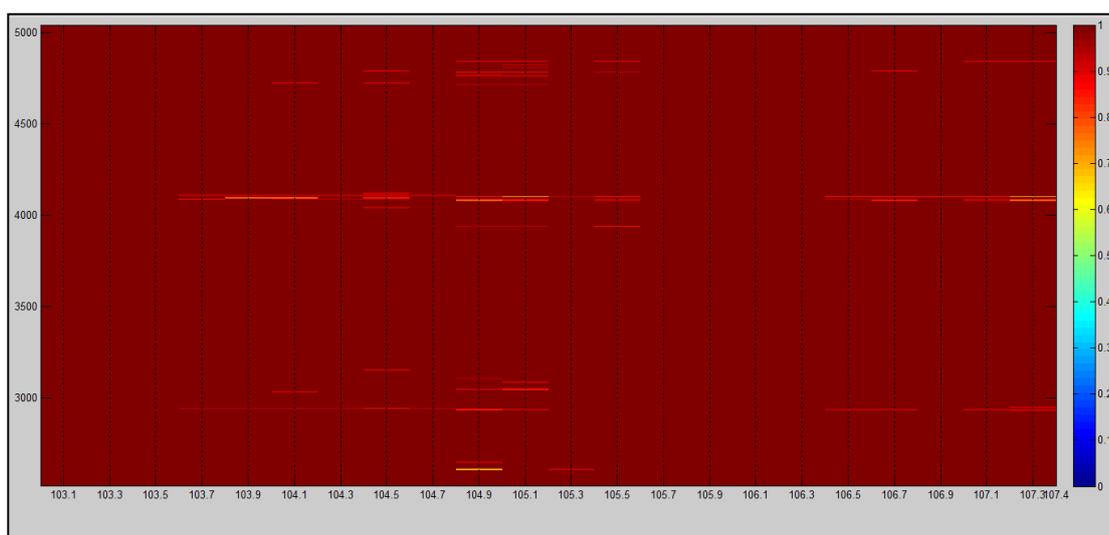


Figura 4.44: Disponibilidad de los canales desde 103.1 MHz hasta 107.3 MHz de 2500 a 5000 minutos.

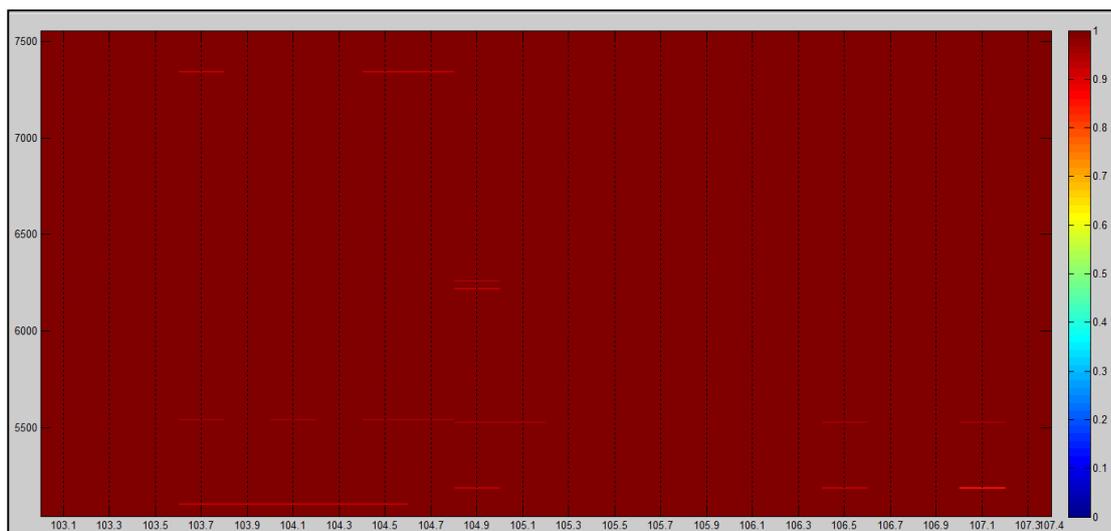


Figura 4.45: Disponibilidad de los canales desde 103.1 MHz hasta 107.3 MHz de 5000 a 7500 minutos

El análisis de la gráfica 4.46 muestra que la disponibilidad es muy baja para el rango de 103.1 MHz a 107.3 MHz en ese intervalo de tiempo, pero el canal que muestra un poco más de disponibilidad es el 104.9 MHz.

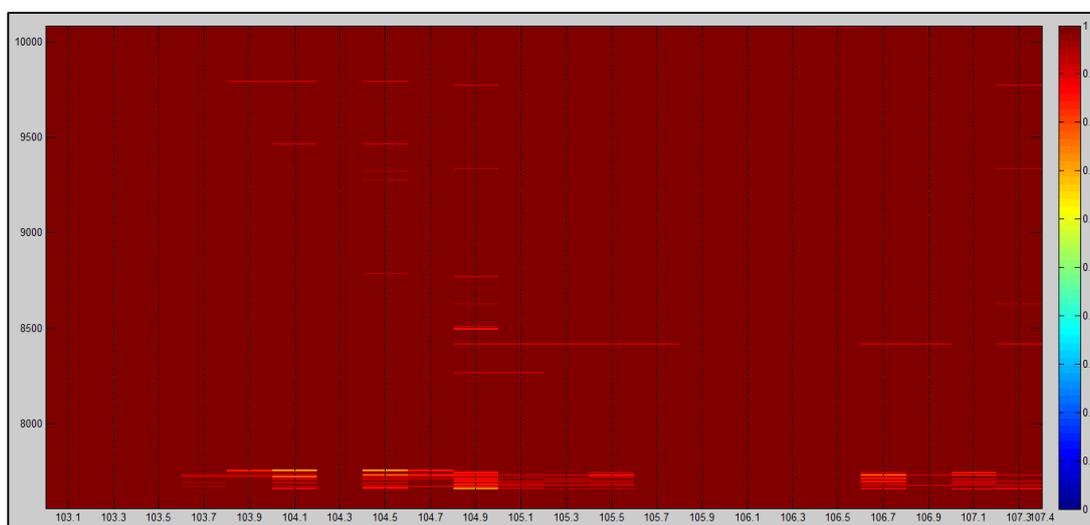


Figura 4.46: Disponibilidad de los canales desde 103.1 MHz hasta 107.3 MHz de 7500 a 10000 minutos.

Debido a que el canal 104.9 MHz mostró una mayor disponibilidad que los demás canales, se lo modeló estadísticamente con las funciones Gumbel Min, Error y Laplace con los parámetros que se pueden apreciar en la figura 4.47.

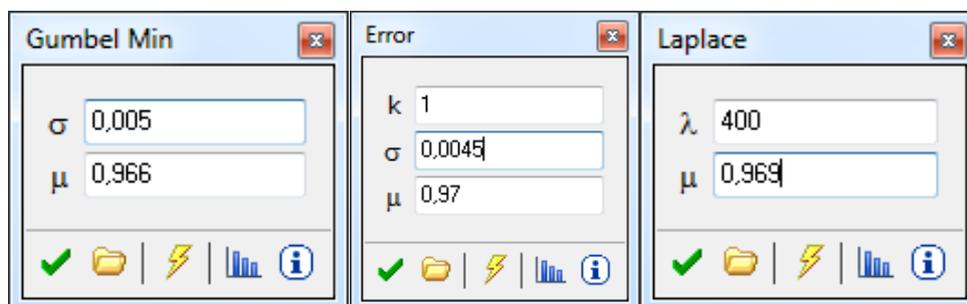


Figura 4.47: Funciones estadísticas utilizadas para la aproximación de la muestra de disponibilidad del canal 104.9 MHz.

En la figura 4.48 se puede observar la prueba de Kolmogorov-Smirnov con la función estadística Gumbel Min que fue la que más se le aproximó.

Gumbel Min [#23]					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	1541				
Estadística	0,03356				
Valor P	0,06079				
Rango	1				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	0,02733	0,03115	0,03459	0,03867	0,0415
Rechazar?	Sí	Sí	No	No	No

Figura 4.48: Cuadro de aceptación de prueba KS para la función estadística Gumbel Min con la muestra del canal 104.9 MHz.

La gráfica de las funciones estadísticas de la figura 4.49 se ajustan al CDF del canal estudiado, estas son Laplace, Gumbel Min y Error, la función Gumbel min es aquella que se ajusta más al canal, esto de acuerdo a la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.

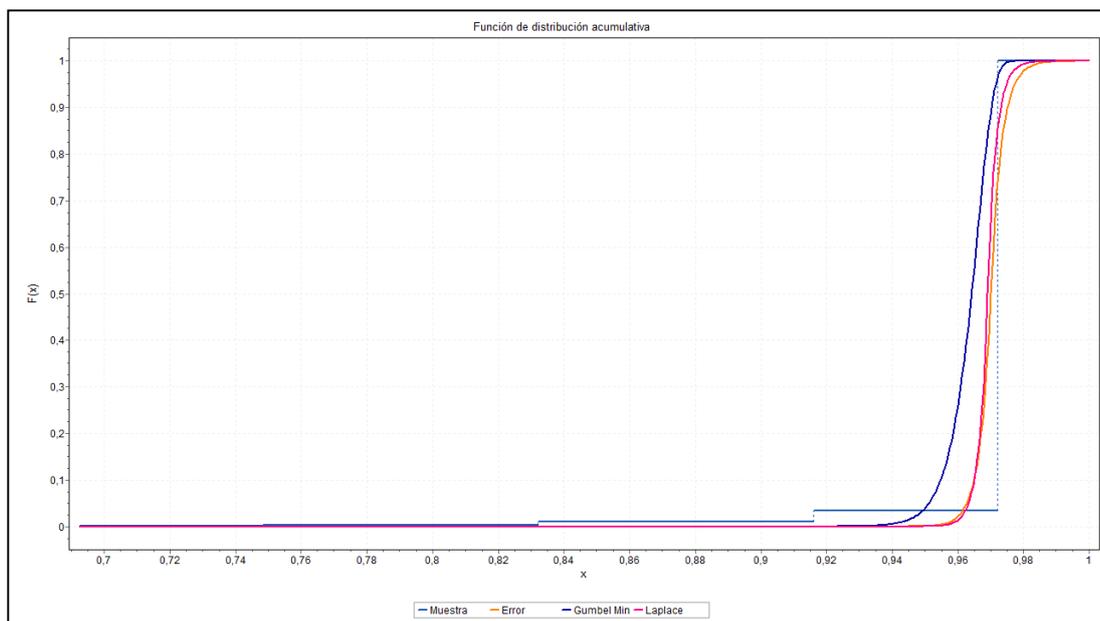


Figura 4.49: Funciones estadísticas de distribución acumulativa y muestra de la disponibilidad de los canales

### 4.3 Disponibilidad de banda por piso

Como se puede observar en la figura 4.50 en el cuadro los valores de CDF para cada piso representan la probabilidad de encontrar un cierto número de canales disponibles a lo largo del tiempo, sin embargo para este caso se puede notar que tanto para planta alta y planta media la disponibilidad de algún canal en la banda es nula y para el piso inferior la disponibilidad en el tiempo extremadamente baja para la cantidad de canales en estudio.

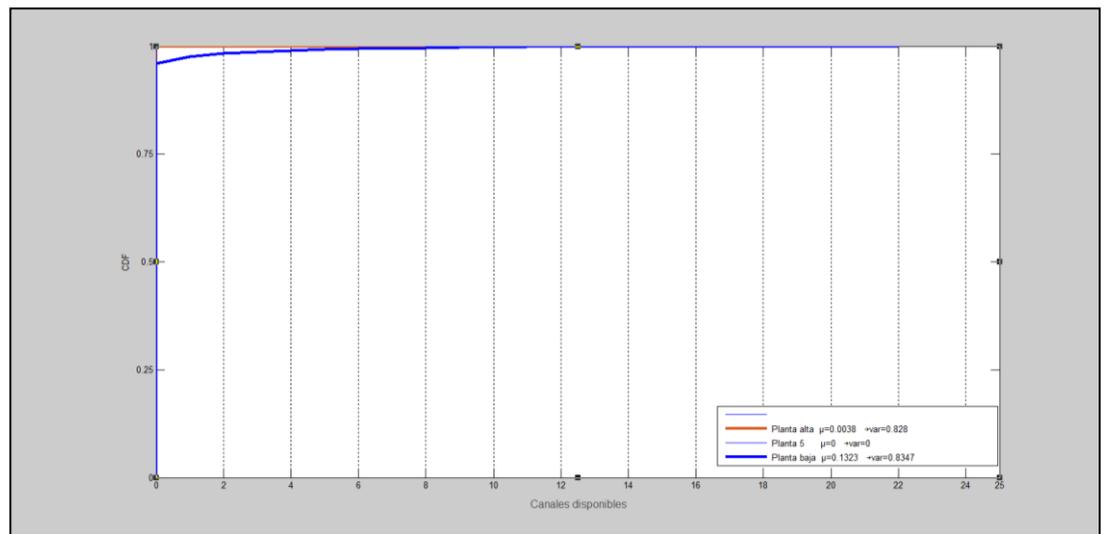


Figura 4.50: Disponibilidad de banda por piso

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. Se realizó la medición de los niveles de potencia de cada canal perteneciente a las banda de frecuencias de radiotransmisión FM de 88.1 MHz hasta 107.3 MHz para 3 plantas de un edificio del centro de la ciudad de Guayaquil, conociendo las diferencias de potencia para cada uno de los canales estudiados conforme la localización de nuestro receptor dentro del edificio, los canales estudiados disminuyen su nivel de potencia de recepción conforme el receptor baja desde la parte más alta del edificio llegando a la conclusión de que pese a que la potencia disminuye la potencia mínima requerida para el sistema FM se conserva para la mayor parte del tiempo de estudio en cada piso.
2. Se pudo observar que las mínimas pérdidas observadas en cada canal de estudio en la banda FM son debido al tipo de ondas electromagnéticas en estudio UHF que son de menor frecuencia comparada con otros sistemas de comunicación que les permite viajar a mayor distancia con menor pérdida de potencia de recepción.
3. Se estudió el comportamiento los canales FM para cada piso y se conoció los modelos de distribución estadísticas permitentes para los canales con más disponibilidad, dando resultados para funciones Gumbel Min, Laplace, Error y Logistic, donde las pruebas de bondad de ajuste arrojan positivo con un 95% aceptación de la función distribución estadística con el modelamiento del canal de estudio.
4. Se determinó la probabilidad de disponibilidad de canal, y la probabilidad de uso del sistema FM en Guayaquil, y se concluyó que el sistema está en uso en las 24 horas del día para la mayor parte de canales debido a que un sistema de comunicación masivo y de uso comercial al igual que la televisión.
5. Se calculó en base a estudios que el sistema de comunicación comercial FM está muy arraigado a las personas de la ciudad de Guayaquil y a muchos sectores del Ecuador lo que vuelve muy difícil el uso de esta banda de frecuencias para disponibilidad de algún otro tipo de comunicación y que la

disminución del sistema a mediano plazo es poco probable debido a su cobertura.

6. El equipo de análisis RTL SDR junto a al software de computadora Matlab nos permitió programar de manera interactiva rangos de captura de acuerdo a las especificaciones y límites del RTL SDR de manera continua para los días de estudio de la banda FM en el edificio así como analizar los datos obtenidos de la captura con modelos matemáticos y gráficos de imágenes, colores y barras a lo largo del estudio de cada canal.
7. El software de computadora de análisis estadístico EasyFit permitió analizar de manera rápida la distribución de los datos obtenidos para los canales con mayor disponibilidad del sistema estudiado así como ajustar los diferentes modelos estadísticos y curvas de probabilidad obteniendo los mejores resultados de modelamiento y realizando los cálculos de bondad de ajuste respectivos para aceptar o descartar los modelos de acuerdo a nuestro criterio de 95% de confiabilidad.
8. El análisis realizado y los estudio de curvas de probabilidad de disponibilidad y aprovechamiento de las frecuencias de comunicación del sistema FM en Guayaquil en un punto céntrico de la ciudad demuestra que la posibilidad de disponibilidad es muy baja y que el sistema está lejos de ser abandonado o cambiado por algún otro tipo de tecnología dentro de unos 5 años.
9. La discontinuidad de los canales FM de su rango normal de 200 KHz a 400 KHz no demostró una posibilidad de disponibilidad mayor debido a que este sistema es propicio a interferencias co-canal por parte de las estaciones de transmisión cercanos evitando algún tipo de transmisión sin interferencia.

## **Recomendaciones**

1. Para una efectiva medición de los canales de la frecuencia FM demanda un espacio libre de interferencias como motores o generadores eléctricos, debido a que distorsionan las señales electromagnéticas receptadas en el RTL-SDR.
2. Es importante una buena configuración en el equipo de medición para que pueda captar el rango de frecuencias de la radiodifusión FM y los anchos de banda de los canales correctos

3. La localización correcta de los equipos debe ser en un lugar ventilado, que permita la captura continua de datos y evite el calentamiento y posible daño de los equipos de medición (computadora, RTL-SDR).
4. Es recomendable utilizar equipo de mayor capacidad de procesamiento de datos como el USRP, debido a que equipos de baja capacidad tienden a detenerse o dejar de funcionar por trabajar al límite de su capacidad.
5. Es recomendable usar software de reconocimiento de patrón estadístico y modelamiento de gran cantidad de datos para analizar de mejor manera los datos obtenidos por el receptor RTL-SDR.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Juárez (2015, septiembre). "Atraso tecnológico mete ruido en la radio AM." Disponible en <http://eleconomista.com.mx/industrias/2015/09/29/atraso-tecnologico-mete-ruido-radio-am>
- [2] J. Xue, Z. Feng, K. Chen. Beijing Spectrum Survey for Cognitive Radio Applications.
- [3] D. Guillen (2013, abril). "El Conatel aprobó el uso de la red 4G a la telefónica estatal CNT". Disponible en: <http://lte-movil4g.blogspot.com/2013/04/ecuador-el-conatel-aprobo-el-uso-de-la.html>
- [4] Diario El Universo Disponible en:  
<http://www.eluniverso.com/2008/07/05/0001/1064/86F444DC88514A8B97757214FAF5B3AF.html>
- [5] Disponible en: <http://nextvlatam.com/univisa-de-ecuador-estreno-su-dth-y-comienza-a-migrar-su-operacion-de-mmds/?lang=es>
- [6] J. M. Miguel, "Radiodifusión en FM," en Receptores de radio monochip para FM, vol. 107, Barcelona, Ed. España Universidad Politécnica De Cataluña, 2005.
- [7] J. Aloy, (2000, septiembre). Antena Direccional de FM. Disponible en:  
<http://arieldx.tripod.com/estaciondx/proyectos/yagiFM.htm>
- [8] A. Álvarez (2014, octubre). El problema de la intermodulación en FM. Disponible en: <http://www.radioworld.com/article/el-problema-de-la-intermodulaci%C3%B3n-en-FM/271236>
- [9] El espectro radioeléctrico en Mexico. Estudio y Acciones.  
Disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/el-espectro-radioel-ctrico-en-mexico.estudio-y-acciones-final-consulta.pdf>
- [10] (1992, febrero) Scott Y. Seidel, Student Member, IEEE, and Theodore S. Rappaport, Senior Member, IEEE 914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings

- [11] C. Sanvanez, R. Ramanathan Opportunistic Spectrum Access: Challenges, Architecture, Protocols Disponible en: <http://www.ir.bbn.com/~ramanath/pdf/osa-wicon06.pdf>
- [12] Disponible en: <http://www.digi.com/resources/standards-and-technologies/rfmodems/receiver-sensitivity>
- [13] Evolución de las Telecomunicaciones
- [14] LOS INICIOS DE LA RADIODIFUSIÓN EN ECUADOR / RADIO “EL PRADO” Dr. Carlos Ortiz Arellano Disponible en: [http://www.culturaenecuador.org/artes/personajes-de-chimborazo/193-los-inicios-de-la-radiodifusion-en-ecuador-radio-el-prado.html#\\_ftn1](http://www.culturaenecuador.org/artes/personajes-de-chimborazo/193-los-inicios-de-la-radiodifusion-en-ecuador-radio-el-prado.html#_ftn1)
- [15] Historia de la radio disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Historia\\_de\\_la\\_radio](https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_radio)
- [16] Plan Nacional de Frecuencias (2012) CONATEL
- [17] (2012) Unión Internacional de Telecomunicaciones. Reglamento de Radiocomunicaciones
- [18] B.Lopez (2009). Análisis de las Normas Técnicas y Regulaciones que Rigen a las Estaciones de Radiocomunicación.
- [19] Anónimo (2010, julio). Disponible en: <http://lacomunicacionylaradio.blogspot.com/2010/07/la-radio-en-la-actualidad.html>
- [20] P. Sawers (2003, Noviembre). The future of radio. Disponible en: <http://thenextweb.com/insider/2013/11/27/the-future-of-radio/#gref>
- [21] Instituto de Ingenieros de Radio. Disponible en <http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/525-modulaci%C3%B3n-fm>
- [22] Frecuencia Modulada [https://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia\\_modulada](https://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia_modulada)
- [23] Disponible en: [http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7053/7053985/tema\\_2\\_2007\\_2008\\_b.pdf](http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7053/7053985/tema_2_2007_2008_b.pdf)

[24] S. Garcia. ¿Cómo se transdorma el sonido en electricidad? Disponible en: <http://www.analfatecnicos.net/pregunta.php?id=9>

[25] Radiodifusión de baja potencia - Radios Libres. Una Introducción Técnica. Disponible en: <http://www.analfatecnicos.net/archivos/16.RadiodifusionBajaPotenciaRadiosLibres.pdf>

[26] S. Garcia. ¿Qué distancia cubro con mi transmisor y mi antena? Disponible en: <http://www.analfatecnicos.net/pregunta.php?id=21>

[27] Disponible en: <https://events.ccc.de/congress/2013/Fahrplan/system/attachments/2230/original/30c3-RFArray.pdf>

[28] Pablo Turmero. Comunicaciones en la banda VHF y UHF, Disponible en <http://www.monografias.com/trabajos104/comunicaciones-banda-vhf-y-uhf/comunicaciones-banda-vhf-y-uhf.shtml>

[29] R. Bernal (2015, noviembre). Reordenan la radio en Panamá. Disponible en: [http://www.prensa.com/economia/Banda-FM-cambiara-dial\\_0\\_4350315080.html](http://www.prensa.com/economia/Banda-FM-cambiara-dial_0_4350315080.html)

[30] BBC Mundo (2015, abril). El fin de una era: Noruega, primer país del mundo en apagar su señal de FM. Disponible en: [http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/04/150421\\_tecnologia\\_noruega\\_radio\\_fm\\_cambio\\_digital\\_ig](http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/04/150421_tecnologia_noruega_radio_fm_cambio_digital_ig)

[31] Disponible en: <https://www.niksun.com/presentations/day3-wireless/Chandramouli.pdf>

[32] <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v10n19/v10n19a07.pdf>

[33] M. Nekovee. A Survey of Cognitive Radio Access to TV White Spaces, Hindawi Publishing Corporation - International Journal of Digital Multimedia Broadcasting, 2010

[34] Qing Zhao, Sadler, B.M. "A Survey of Dynamic Spectrum Access," *Signal Processing Magazine, IEEE* , vol.24, no.3, pp.79,89, May 2007

- [35] José Huidrobo (octubre, 2014) Uso Eficiente del Espectro y “White Space”  
Disponible en: <http://www.zonamovilidad.es/noticia/2392/Reportajes/Uso-eficiente-del-espectro--y-White-Spaces.html>
- [36] A. Khattab, D. Perkins, M. Ayoumi Springer editorial new York 2013 Cognitive Radio Networks: From Theory to Practice
- [37] Disponible en:  
[http://www.netmode.ntua.gr/courses/postgraduate/mobile\\_personal\\_communications/2010/Set11\\_Dynamic\\_Spectrum.pdf](http://www.netmode.ntua.gr/courses/postgraduate/mobile_personal_communications/2010/Set11_Dynamic_Spectrum.pdf)
- [38] J. Gomez (2015) Modelado de la Disponibilidad De Canales de la Banda Uhf-Tv para el uso Potencial De Sistemas con Acceso Oportunista Al Espectro (Osa) En Una Zona Urbana
- [39] C. Xin, M. Song., Spectrum Sharing for Wireless Communications. Springer.
- [40] Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052012000200007](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052012000200007)
- [41] Tian Z, Giannakis G (2006) A wavelet approach to wideband spectrum sensing for cognitive radios. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2006. 1<sup>st</sup> International Conference on, pp 1–5
- [42] Y. Zhang (Junio 2009) Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks: Opportunistic

## ANEXOS

### Códigos de MATLAB

```

1  %*****Función principal*****%
2  %% Entrada: Frecuencia inicial, Ancho de Banda, Numero de datos por canal, Numero de canales, Nu
3  %% Salida: Archivo con dato de canal
4  function []= main3(freq,BW,n_muestras,n_canales,n_canal_vez)
5  fc=freq;
6  tic
7  for i=1:n_muestras*n_canales/n_canal_vez
8  radio=Conf_RTL_SDR(fc,BW);
9  [cap,data,freq_eje]=Captura_espectro_alavez(radio,fc,BW,n_canal_vez);
10 %% Si desea ver el espectro seleccionar la siguiente linea y usar Ctrl+T
11 % Mostrar_espectro(data,freq_eje);
12 %% Si no desea ver el espectro seleccionar la linea anterior y usar Ctrl+R
13 % Grabar_alavez(cap,i,n_canales,n_canal_vez);
14 Grabar(cap,i,n_canales/n_canal_vez);
15 % pause(0.01);%% Seleccionar la linea y digitar Ctrl+R para no usarla
16 reset(radio);
17 release(radio);
18 fc=freq+rem(i,n_canales/n_canal_vez)*BW;
19 end
20 toc
21 end
  
```

Figura A.1: Código MATLAB para adquisición de datos con el RTL

Análisis Kolmogorov						
Disponibilidad	Frecuencia	fn	Fn	Ff	Fn-Ff	Fn-1-Ff
0.384615385	1	0.000649351	0.000649351	0.0000000000	0.00064935	0.000000000000
0.461538462	3	0.001948052	0.002597403	0.0000000000	0.0025974	0.000649350649
0.538461538	2	0.001298701	0.003896104	0.0000000000	0.0038961	0.002597402597
0.615384615	1	0.000649351	0.004545455	0.0000000000	0.00454545	0.003896103896
0.692307692	5	0.003246753	0.007792208	0.0000000000	0.00779221	0.004545454545
0.769230769	3	0.001948052	0.00974026	0.0000000000	0.00974026	0.007792207792
0.846153846	10	0.006493506	0.016233766	0.00000000473	0.01623376	0.009740255010
0.923076923	25	0.016233766	0.032467532	0.02246149699	0.01000604	0.006227730761
1	1490	0.967532468	1	No	No	No
N	1540					
Gumbel Min					Max	Estadístico sk
0.005					0.01623376	0.034605044
0.942						
						1 Acepta

Figura A.2: Análisis de K-S analítico para la frecuencia de 90.5



