



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“ESTUDIO DE NIVELES DE INTERFERENCIA EN
ESCENARIOS URBANO, SEMI-URBANO Y
RESIDENCIAL PARA EL DESPLIEGUE DE REDES DE
SENSORES INALÁMBRICOS”

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Xavier Agustín Villacrés Ventura

Luis Steeven Peñafiel Conde

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a Dios por las pruebas y bendiciones que ha puesto sobre mi persona y mi familia. A mi familia por su apoyo y aprecio. Mi mayor gratitud a mis compañeros de los Laboratorios de Computación y en especial a MSc. Margarita Filian quienes fueron parte de una etapa importante de mi vida universitaria y profesional. Mi gratitud hacia aquellos profesores de quienes más allá de tener la oportunidad de llevarme conocimientos tuve el honor de llevarme una amistad. De manera especial al MSc. Jorge Gómez y MSc. Carlos Valdivieso mi infinito agradecimiento por su valiosa colaboración para la realización de éste proyecto.

Xavier Villacrés Ventura

Mis más sinceros agradecimientos a Dios por ser el motor de mi vida, un especial agradecimiento a mis padres y hermano que son una bendición y me han brindado su apoyo incondicional en cada una de mis decisiones, las cuales han hecho posible concluir con cada una de mis metas. Mi gratitud hacia mis maestros de la ESPOL que compartieron sus conocimientos y experiencias que me permitieron crecer de manera profesional.

Luis Peñafiel Conde

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres Agustín y Gregoria, quienes con su inmenso amor me han sabido guiar durante estos veintidós años, han sido mi motivo e inspiración para llegar a esta meta. A mi hermano Christian y primo Kevin quienes forman parte importante en mi vida, a mi primo Carlos quien fue mi motivo para estudiar en esta universidad y a quien considero mi hermano mayor. A mi Mayra, quien ha sido mi inspiración, mi compañía y apoyo durante estos años de estudio y a quien dedico este proyecto con todo mi amor.

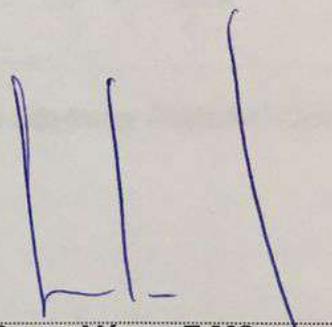
Xavier Villacrés Ventura

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



Carlos Valdivieso A. MSc.

PROFESOR EVALUADOR

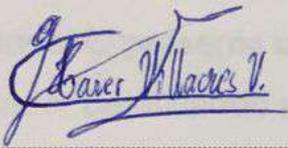


Cesar Yépez F MSc.

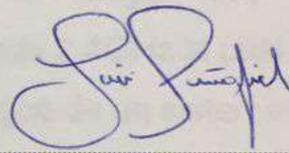
PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos 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"



Xavier Agustín Villacrés Ventura



Luis Steeven Peñafiel Conde

RESUMEN

El presente proyecto surge de la importancia que representa el realizar un uso apropiado de los recursos limitados que proporciona el espectro radioeléctrico. El auge en el desarrollo de dispositivos y aplicaciones de sistemas WSN en áreas tales como Seguridad y Monitoreo, Agricultura Inteligente, Control de Tráfico Vehicular, Sistemas de Parqueos entre otros, demanda un mayor uso del espectro radioeléctrico. El presente estudio se centra en la banda 2.4GHz la cual es una banda no licenciada, permitiendo que resulte fácil el despliegue de un sistema o dispositivos sobre esta banda. Por tal motivo, existe una mayor concentración de equipos operando dentro de esta banda en un área determinada, donde existe una gran variedad de dispositivos compitiendo por el acceso al espectro, los cuales pueden funcionar en diferentes tecnologías como son: WI-FI, Bluetooth y Zig-Bee. Estos puntos se tornan claves a la hora del diseño e implementación de un sistema WSN.

En el presente proyecto se realiza una campaña de medición en tres diferentes escenarios en ambientes exteriores durante aproximadamente una semana obteniendo como resultado una muestra con alrededor de 300000 datos. La captura de datos se realiza mediante una antena SIRIO, un equipo SDR, y un programa desarrollado en LABVIEW. Los datos recolectados son procesados, permitiendo presentar los resultados obtenidos mediante gráficas comparativas de los niveles de potencia de los canales en el tiempo, CDFs por canales, Espectrogramas de Potencia y Disponibilidad. En el Anexo 1 y Anexo 2 se muestran los VIs desarrollados en LabView y funciones desarrolladas en Matlab utilizadas respectivamente para la captura y procesamiento de los datos.

Finalmente, mediante las gráficas de los resultados se puede conocer los niveles de interferencia, comportamiento y ocupación de cada uno de los canales de esta banda.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
CAPÍTULO 1.....	1
1. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Problemática	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Objetivos	5
1.4.1. Objetivo General:.....	5
1.4.2. Objetivos Específicos:	5
1.5 Metodología.....	5
1.6 Alcance	6
CAPÍTULO 2.....	8
2. ESTADO DEL ARTE	8
2.1 Internet de las Cosas (IoT)	8
2.2 Smart Cities.....	8
2.3 Red de Sensores Inalámbricos (WSN)	9
2.3.1. Elementos de WSN	11
2.4 Regulaciones de espectro para la banda ISM	14
2.4.1. FCC.....	15
2.4.2. ETSI	16
2.5 Tecnologías de Comunicación Inalámbrica	16

2.5.1. IEEE 802.11	17
2.5.2. Asignación de Canales en la banda de 2.4 GHz	22
2.5.3. IEEE 802.15.1	24
2.5.4. IEEE 802.15.4 (Zig-Bee).....	25
2.6 Comparación entre los diferentes estándares.....	27
2.7 Estudios realizados sobre ocupación del espectro y niveles de interferencia.....	28
CAPÍTULO 3.....	30
3. METODOLOGÍA Y MODELAMIENTO.....	30
3.1 Descripción del Escenario	30
3.2 Metodología aplicada en el escenario.....	32
3.3 Análisis de los datos	34
CAPÍTULO 4.....	36
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	36
4.1 Localización geográfica del escenario	36
4.2 Parámetros de Configuración	36
4.3 Análisis de los Resultados.....	37
4.3.1. Análisis temporal de los datos	37
4.3.2. Disponibilidad	68
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXOS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Máscara de Wi-Fi por DSSS	21
Figura 2.2: Máscara de Wi-Fi por OFDM	21
Figura 2.3: Canales de Wi-Fi en la banda 2.4GHz	23
Figura 2.4: Máscara de transmisión de Bluetooth	25
Figura 2.5: Canales de Zig-Bee en la banda 2.4GHz	26
Figura 2.6: Máscara de transmisión de Zig-Bee	27
Figura 3.1: Escenario Urbano	30
Figura 3.2: Escenario Semi-Urbano	31
Figura 3.3: Escenario Residencial	31
Figura 3.4: Sistema de medición	32
Figura 3.5: Tarjeta SBX	33
Figura 4.1: Potencia vs Tiempo (Canal 1)	38
Figura 4.2: Potencia vs Tiempo (Canal 2)	39
Figura 4.3: Potencia vs Tiempo (Canal 3)	40
Figura 4.4: Potencia vs Tiempo (Canal 4)	41
Figura 4.5: Potencia vs Tiempo (Canal 5)	42
Figura 4.6: Potencia vs Tiempo (Canal 5)	43
Figura 4.7: Potencia vs Tiempo (Canal 7)	44
Figura 4.8: Potencia vs Tiempo (Canal 8)	45
Figura 4.9: Potencia vs Tiempo (Canal 9)	46
Figura 4.10: Potencia vs Tiempo (Canal 10)	47
Figura 4.11: Potencia vs Tiempo (Canal 11)	48
Figura 4.12: Potencia vs Tiempo (Canal 12)	49
Figura 4.13: Potencia vs Tiempo (Canal 13)	50
Figura 4.14: Función CDF del Canal 1 en los tres escenarios	51
Figura 4.15: Función CDF del Canal 2 en los tres escenarios	52
Figura 4.16: Función CDF del Canal 3 en los tres escenarios	53
Figura 4.17: Función CDF del Canal 4 en los tres escenarios	54
Figura 4.18: Función CDF del Canal 5 en los tres escenarios	55
Figura 4.19: Función CDF del Canal 6 en los tres escenarios	56
Figura 4.20: Función CDF del Canal 7 en los tres escenarios	57
Figura 4.21: Función CDF del Canal 8 en los tres escenarios	58
Figura 4.22: Función CDF del Canal 9 en los tres escenarios	59
Figura 4.23: Función CDF del Canal 10 en los tres escenarios	60
Figura 4.24: Función CDF del Canal 11 en los tres escenarios	61
Figura 4.25: Función CDF del Canal 12 en los tres escenarios	62

Figura 4.26: Función CDF del Canal 13 en los tres escenarios	63
Figura 4.27: Espectrograma de escenario Urbano	65
Figura 4.28: Espectrograma de escenario Semi-Urbano	66
Figura 4.29: Espectrograma de escenario Residencial	67
Figura 4.30: Disponibilidad en el escenario Urbano	69
Figura 4.31: Disponibilidad en el escenario Semi-Urbano.....	70
Figura 4.32: Disponibilidad en el escenario Residencial	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Sensores.....	11
Tabla 2: Motas	12
Tabla 3: Gateways.....	13
Tabla 4: Niveles de potencia de transmisión en las bandas U-NII regulados por la FCC	16
Tabla 5: Niveles de EIRP regulados por el ETSI.....	16
Tabla 6: Estándares de la tecnología Wi-Fi	18
Tabla 7: Características del protocolo 802.11a	19
Tabla 8: Características del protocolo 802.11	20
Tabla 9: Frecuencia central de los canales de Wi-Fi.....	23
Tabla 10: Características de Bluetooth	24
Tabla 11: Características de Zig-Bee.....	26
Tabla 12: Comparación de protocolos	28
Tabla 13: Coordenadas geográficas de los escenarios.....	36
Tabla 14: Parámetros de configuración	37

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

1.1 Antecedentes

La ciudad de Guayaquil como una de las ciudades con mayor desarrollo en Latinoamérica busca en su modelo de crecimiento llegar a convertirse en una Smart City, como se lo ha mencionado anteriormente en su proyecto Guayaquil Ciudad Digital [1] .

Guayaquil ha implementado varios servicios como el sistema de Ojos de Águila el cual es un sistema de circuito cerrado que contempla alrededor de 850 cámaras, Puntos de acceso a internet gratuito, entrega de Tablet a estudiantes para el acceso a las TICs y servicios de trámites municipales en línea [2].

Estos son unos de los primeros proyectos que se han puesto en marcha para convertir a Guayaquil en una ciudad Inteligente. El objetivo de una ciudad inteligente es mejorar la calidad de vida de sus habitantes gracias al desarrollo y empleo de la tecnología, proporcionando soluciones en temas de economía, productividad, ambiente, movilidad, educación, salud y seguridad [3].

Como un paso próximo se prevé la implementación de redes de sensores conformadas por un grupo de elementos que tienen como objetivo medir parámetros del entorno, procesarlos y transmitirlos para tomar acciones o reaccionar a eventos o fenómenos en un ambiente específico. Redes de Sensores que nos brinden vigilancia de las condiciones estructurales de edificios y puentes, condiciones ambientales en parques, automatización de la movilización censando el tráfico en las diferentes zonas de la ciudad y actuando sobre los semáforos brindando una mayor agilización, espacios libres en parqueos alrededor de la ciudad.

Esta Red de Sensores (NS) pueden diferir en su medio de transmisión de datos sea este inalámbrico o alámbrico. Debido a las limitantes que se tienen al momento de escoger un sistema alámbrico, la Red de Sensores Inalámbricos (WSN) es una excelente opción para implementación.

Una Red de Sensores Inalámbricos (WSN) es una tecnología en auge, la cual puede utilizar varias tecnologías inalámbricas para transmitir datos como Bluetooth, ZigBee, WLANS, WiMax y Redes Móviles. La banda de mayor uso para su implementación y en la cual nos vamos a enfocar es la banda ISM de 2.4GHz. En la actualidad existen una gran variedad de dispositivos como Smart TVs, teléfonos móviles, teléfonos fijos inalámbricos, reproductores de DVD, Computadoras y periféricos inalámbricos, laptop, tablets y Bluetooth que operan sobre las mismas bandas. Debido a la gran cantidad de sistemas que se implementan sobre esta banda es necesario realizar un estudio de Interferencias que permita tomar decisión al momento de la implementación de un sistema de Redes de Sensores Inalámbricos WSN.

1.2 Problemática

La implementación de una red de sensores inalámbricos WSN se basa principalmente en la utilización de la banda Industrial, Scientific and Medical (ISM) de 2.4 GHz. El problema fundamental al cual nos enfrentamos son los altos niveles de interferencia que se presentan, teniendo mayor énfasis en la banda de 2.4 GHz ya que es la más utilizada en la actualidad, causados por la gran concentración de dispositivos en un área determinada que dentro de su sistema de comunicación inalámbrica son diseñados para trabajar sobre esta banda ISM, entre los cuales podemos mencionar las Wireless Local Access Network (WLAN) implementadas en hogares, centros comerciales y demás lugares donde tengamos un punto de acceso Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, así también usadas por los teléfonos inalámbricos de la red fija y microondas que encontramos en los hogares entre otros. Esta banda presenta ciertas ventajas como la fácil implementación de sistemas, efectividad en temas de costo ya que es una banda por la cual no se debe realizar una concesión por lo tanto está disponible para cualquier implementación, disponibilidad de dispositivos ya que existen muchos dispositivos que trabajan sobre esta banda.

La implementación y el desarrollo de Redes de Sensores Inalámbricos se extiende a varias aplicaciones que incluyen sistemas que van de pequeña a gran

escala con las cuales se presentan diferentes escenarios que pueden inducir a grandes niveles de interferencias. Las principales fuentes de interferencia apuntan a las WLANS. Debido a que esta banda no está normada por algún tipo de entidad gubernamental local, no existen restricciones o limitantes respecto a los niveles de interferencia al momento de implementarlas más allá de las normas que cumplen los equipos de acuerdo a la Federal Communications Commission (FCC) acerca de los niveles de potencia y el Standard 802.11b/a/g/n/ac. Por lo cual se han desarrollado técnicas de espectro ensanchado, técnicas de detección de errores, que permiten a los sistemas ser más robustos frente a interferencias. [4]

Este tipo de sistema de comunicación inalámbrica está presto a coexistir frente a interferencias producidas por la interferencia co-canal la cual se debe a que dos o más transmisores usan el mismo canal de comunicación, Interferencia de canal adyacente debido a la distancia entre los canales lo cual produce que se traslapen. El gran problema ocurre cuando el canal está siendo utilizado a la par por más de dos transmisores, causando congestión en el canal. Por lo tanto, mientras más dispositivos estén usando el mismo canal a la vez, se presentará una mayor cantidad de errores en los paquetes transmitidos reduciendo así la calidad de servicio, produciendo comportamientos inesperados, limitaciones en las tasas de transmisión, rango de cobertura.

1.3 Justificación

El espectro radio eléctrico es un recurso limitado, el cual es importante estudiar y optimizar. Las bandas de ISM sobre todo 2.4GHz son bandas que están aumentando de manera exponencial su uso para dispositivos inalámbricos; por lo que, en otros lugares del mundo como Estados Unidos y países europeos como Alemania, Francia, España ya se han realizado campañas de medición para tener una idea clara de la utilización de estos canales [5], [6] . Con el desarrollo de la ciudad de Guayaquil hacia una ciudad Inteligente que involucra la implementación de Redes de Sensores inalámbricos, se ve necesario un estudio de los niveles de interferencia en diferentes escenarios de la localidad.

Siendo Guayaquil una de las ciudades más grandes de Ecuador y al ser una de las que presenta mayor desarrollo tecnológico dentro del país, se presentaran escenarios mucho más afectados por las interferencias producidas debido al uso de la banda de 2.4GHz. Como anteriormente se mencionó, se ha realizado este tipo de estudios en otra partes del mundo, pero aquello no garantiza que los resultados obtenidos en las investigaciones mencionadas sean de uso para nuestro estudio en curso, ya que Guayaquil es una ciudad con condiciones meteorológicas, ambientales, poblacional particulares, por esta razón es necesario enfocarse en aquellos parámetros y factores que hacen diferencia en relación a los resultados ya publicados y así de esta manera sea posible la implementación de óptimos sistemas WSN que aproveche al máximo la capacidad del canal.

Una de la grandes importancias del desarrollo de esta investigación radica en la necesidad de conocer el comportamiento que presentan las bandas, que se estudiarán, para ambientes externos, lo cual representa una prioridad en nuestro estudio ya que se cuenta con estudios previos en los cuales se han analizado estas bandas pero con un enfoque destinado a entornos internos o estudios destinados a mediciones del espectro en un rango de banda mucho más amplio lo cual no tiene un enfoque profundo sobre nuestro caso de estudio, este interés surge a partir del acelerado avance tecnológico que actualmente se está manifestando en Guayaquil por convertirse en una ciudad intercomunicada llevándola a ser una Smart City.

Para el desarrollo e implementación de una red de sensores debemos tener en consideración las especificaciones técnicas de una comunicación inalámbrica como el límite de ancho de banda, los niveles de potencia y un mal inevitable que es el ruido, interferencias que se añaden al canal inalámbrico y atenuación debido a fenómenos como: reflexión, difracción, absorción, refracción que ocurren durante la propagación de la señal en el espacio [7].

1.4 Objetivos

1.4.1. Objetivo General:

- Determinar los niveles de Interferencia en zonas urbanas, semi-urbanas y residenciales sobre la banda de 2.4 GHz.

1.4.2. Objetivos Específicos:

- Desarrollar un algoritmo de captura para la medición de potencias en la banda de 2.4 GHz.
- Configurar parámetros en el SDR mediante el USRP modelo N210 para realizar la campaña de mediciones.
- Capturar niveles de potencia en la banda de 2.4 GHz mediante los equipos USRP.
- Analizar y procesar de los datos capturados para obtener información acerca de los niveles de Interferencia.
- Realizar un análisis comparativo de los datos obtenidos en los diferentes escenarios estudiados.
- Evaluar la Disponibilidad del Canal en los diferentes ambientes analizados.
- Evaluar la Capacidad de Canal en los diferentes ambientes analizados.

1.5 Metodología

La metodología del proyecto empieza con la preparación de los equipos con los aplicativos necesarios para realizar las mediciones correspondientes, desarrollando un algoritmo que nos permita realizar capturas en los diferentes canales de la Banda ISM de 2.4GHz. El equipo utilizado para las mediciones en el cual será implementado el algoritmo será una Radio Definida por Software (SDR), con lo cual se medirá los niveles de potencia en tres diferentes escenarios de la ciudad de Guayaquil. Estas mediciones serán realizadas en un ambiente exterior.

Es necesario conocer en su totalidad el funcionamiento de los Equipos de medición a usar, para así proceder a configurarlos y prepararlos correctamente de acuerdo a cada uno de los escenarios que se desean analizar. A este punto se debe realizar un estudio de campo para la selección de cada uno de los escenarios a trabajar, los cuales deberán estar sujetos a cumplir con las características representativas de ser un sitio urbano, semi-urbano y residencial. Las Capturas de datos pertenecientes a los diferentes escenarios se realizarán durante un periodo de aproximadamente una semana de manera ininterrumpida, para lo cual se debe monitorear constantemente los equipos mencionados.

Una vez obtenidos los datos, se debe analizarlos para determinar los niveles de interferencia y la disponibilidad de los canales mediante graficas estadísticas. Presentar datos comparativos entre los diferentes ambientes que demuestren características propias del entorno.

1.6 Alcance

Por medio de los resultados obtenidos proporcionar un análisis previo acerca de la utilización de los canales pertenecientes a la Banda ISM 2.4 Ghz para futuros diseños e implementaciones de sistemas de redes de sensores Inalámbricos WSN basados en el análisis de los niveles de interferencia en diferentes escenarios de la ciudad de Guayaquil, con lo cual gracias a la información recopilada poder decidir que canal y que tipo de tecnología es más recomendable desplegar para conseguir un comportamiento esperado respecto a tasas de transmisión de datos, confiabilidad del sistema, rangos de cobertura que me permita determinar las ubicaciones de las motas, estudios de costo beneficio que me permitan decidir qué tipo de motas usar de acuerdo a los niveles mínimos de potencia de Recepción y Transmisión que se recomiendan necesarios para implementación de los sistemas de acuerdo al escenario que se presente.

Crear una base de datos con información, permitiendo que los resultados del estudio de niveles de interferencia en la banda ISM a nivel local puedan brindar

información necesaria para estudios de la utilización eficiente del espectro el cual es un tema esencial debido al crecimiento en implementación de sistemas de comunicación inalámbricas que utiliza como medio el espectro radio eléctrico el cual es un recurso limitado, para lo cual se plantean estudios para implementación de sistemas de acceso al espectro dinámico oportunista, cabe recalcar que en países Europeos como España, Francia e Inglaterra ya se han desarrollado varios estudios sobre OSA (Opportunistic Spectrum Access) [8].

Los datos que se obtendrán ayudarán a determinar el mal uso del espectro dentro de la banda de 2.4GHz que se origina principalmente por las redes WLAN, con esta información obtenida se podría brindar un gran soporte a las universidades, centros comerciales o sitios donde se puedan normar la implementación de las redes. Ya que en estos entornos existen una gran variedad de WLANs propagándose ya sea en ambientes indoor, tales como: dentro de los salones de clases, oficinas, restaurantes, locales comerciales. También los podemos encontrar desplegados en ambientes outdoor como en los parqueaderos, zonas céntricas de la ciudad, lugares turísticos, las cuales se encuentran interactuando simultáneamente en todo momento, por lo cual es conveniente poder analizar todos estos casos y realizar una adecuada implementación y control de este sistema de comunicación para proporcionar un servicio de alta calidad.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE

Mediante el presente Estado del Arte se busca dar a conocer en mayor medida los conceptos mencionados en el capítulo anterior en los cuales nos basamos para el desarrollo del presente estudio.

2.1 Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las cosas se refiere a una infraestructura global para la sociedad de la información, brindando servicios avanzados gracias a la interconexión de objetos (físico o virtual) basados en tecnologías de comunicaciones existentes y en desarrollo como se indica en ITU-T Y.2060 [9]. En el cual busca integrar varias tecnologías como comunicación m2m, redes automáticas, data mining, cloud computing para explotar habilidades de identificación, monitoreo, captura de datos, procesamiento y comunicación. El IoT agrega un nuevo eje o dimensión en el punto de vista de las TIC's donde se hablaba de dos ejes: comunicación en cualquier lugar y en cualquier momento, se introduce el concepto de comunicación de cualquier objeto que representa objetos físicos en el mundo real u objetos virtuales en el mundo de la información que se puedan identificar e integrar a una red de comunicación. En la cual se pueda se pueda monitorear, actuar y conectar. Con la introducción de este nuevo eje, nuevos escenarios, nuevos conceptos y nuevas aplicaciones son desarrolladas, con lo cual un tema en auge es el desarrollo de Smart Cities.

2.2 Smart Cities

Al definir el término de Smart City se presenta cierta complicación ya que no se ha establecido una definición global, esto se debe a que puede ser interpretado de diferentes maneras de un país a otro, e incluso puede ser variante de entre las ciudades de un mismo país, lo cual viene relacionado en gran medida al nivel de desarrollo propio de la región. Lo que si podemos mencionar acerca de una Smart City es que está conformada por un conjunto de infraestructuras de

comunicaciones basadas en redes de sensores inalámbricas, aplicaciones móviles y web, las cuales trabajan de manera compartida, con el objetivo de poder recopilar datos, procesarlos y tomar las respectivas acciones con la intención de ofrecer y garantizar una mejor calidad de vida. [10]

Al hablar de una Smart City, implícitamente nos estamos refiriendo a que se hará un uso masivo de dispositivos inteligentes dentro de esta infraestructura,, en que la obtención de su máximo rendimiento no sólo dependerá de los dispositivos que pertenezcan a esta red, sino también que los usuarios participantes tengan la capacidad intelectual de adaptarse al complejo nivel tecnológico que abarca dicha tecnología, para que de tal manera exista una interacción continua del usuario con el sistema y poder extraer las grandes aportaciones que nos brinda.

El desarrollo de una Smart city se basa en su mayoría alrededor de 4 elementos pilares dentro de una sociedad como lo son la economía, el medioambiente, las construcciones y el gobierno, todos ellos afectan al estilo de vida de los habitantes de un determinado país. Como ejemplo de los elementos que se pueden incluir dentro de los pilares antes mencionados tenemos: análisis del estado de estructuras, monitoreo de parámetros ambientales, redireccionamiento de tráfico vehicular eficiente, verificación de parqueos disponibles en sitios de extrema concurrencia y mucho más. [11]

2.3 Red de Sensores Inalámbricos (WSN)

Una red de sensores (Wireless Sensor Network) está compuesta por un conjunto de sistemas embebidos individuales que interactúan con el ambiente por medio de sensores, procesan información localmente y comunican su información a través de dispositivos inalámbricos con sus vecinos. La intención de esta infraestructura es poder capturar y monitorear parámetros en diversos lugares. Los parámetros a ser censados comúnmente son los de humedad, presión, temperatura, velocidad, intensidad lumínica.

Una red inalámbrica de sensores consiste en tres componentes principales: nodos, gateways y software. Cada nodo consiste de capacidad de procesamiento, memoria, elemento RF transceptor, fuente de poder y un conjunto de sensores con los cuales será capaz de comunicarse con el entorno, con el fin de monitorearlo. Los datos adquiridos son transmitidos desde el nodo inalámbricamente al gateway, el cual puede operar independientemente o conectarse a un sistema principal donde se puede recopilar, procesar, analizar y presentar los parámetros de medición seleccionados mediante un software o aplicativo. [12]

Los puntos de mayor importancia a tener en cuenta en su diseño son los siguientes: tiempo de vida, cobertura, seguridad, facilidad de instalación, tiempo de respuesta, esto mencionándolo de manera general, al referirnos específicamente en sí al diseño del nodo se presentan otras características vitales para su adecuado funcionamiento, como: requerimiento de bajo consumo de energía, robustez en su hardware para poder trabajar en escenarios complejos, programación sencilla, sincronismo con nodos vecinos, dimensiones de diseño optimas que garanticen un bajo coste, capacidad de seguridad a la hora de transmitir datos. [13]

2.3.1. Elementos de WSN

Sensores

Equipos capaces de comunicarse con el entorno que los rodea, y poder recibir mediciones de parámetros del cual el sensor sea capaz de captar. En la Tabla 1 se muestran dos ejemplos de tipo de sensores.

MTS400	GAS BOARD LIBELIUM
Es un sensor ambiental que puede detectar temperatura, luminosidad, humedad, presión barométrica y aceleración	Capaz de captar medidas de monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno, dióxido de nitrógeno, metano, ozono, temperatura, humedad, presión atmosférica.
	

Tabla 1: Sensores

Motas

Circuito embebido con capacidad de procesamiento de datos obtenidos por los sensores, cuentan con un módulo inalámbrico de transmisión-recepción. En la Tabla 2 se comparan dos tipos de motas de fabricantes diferentes con sus respectivas características más importantes.

	XM2110CA	LPR2400
		
Memoria flash	128KB	512KB
RAM	8KB	64KB
Comunicación serial	UART	USB
Corriente (Modo Activo)	8mA	50Ma
Corriente (Modo Sleep)	8uA	10Ua
Banda de Frecuencia	Banda ISM	Banda ISM
Sensibilidad de recepción	-101dBm	-101dBm
Tasa de transmisión	250Kbps	250Kbps
Cobertura	300m	500m

Tabla 2: Motas

Gateways

Permiten el acceso de la red WSN al Internet para alcanzar el servidor que se encargará de procesar todos los datos provenientes de los nodos o simplemente capaz de permitir una conexión directa con el servidor. En la Tabla 3 se adjuntan ejemplos de gateways actualmente disponibles en el mercado.

MIB520	MIB600
Proporciona conectividad entre familias de motas de IRIS y MICA, interfaz USB destinada para su programación.	Permite conexión via Ethernet, alimentación POE, no necesita de alimentación externa.
	

Tabla 3: Gateways

Los desafíos a que toda red WSN se enfrenta, es la necesidad de permanecer en funcionamiento lo máximo de tiempo de vida posible, esto puede ser controlado con la intervención de una técnica valiosa de ahorro de energía, en la que el nodo es capaz de pasar de un modo activo y entrar inmediatamente a un modo Sleep siempre y cuando éste ya no requiera recursos para transmitir datos, de esta forma se consigue una total optimización con respecto al consumo de energía propio del nodo, ya que el mayor tiempo de su vida permanecerá dentro de este estado.

Otra novedad que se debe traer a consideración es que la banda en que trabajan estos dispositivos es extremadamente solicitada, por tanto, sabremos que la

comunicación a través de este medio será compartida por una gran cantidad de dispositivos aledaños. Como solución a dicho problema surgen protocolos que harán posible una comunicación más confiable y con menor probabilidad de pérdida de datos. Tenemos al protocolo MAC para ambientes wireless, el cual nos proporcionará grandes ventajas, ya que define reglas justas para acceder al medio compartido, garantiza que exista un menor número de colisiones de paquetes. Otro protocolo también conocido y usado por las redes WSN es ALOHA, el cual se encarga de forma inteligente tratar de enviar los paquetes en tiempos que otro nodo no lo esté haciendo para evitar colisiones.

2.4 Regulaciones de espectro para la banda ISM

La UIT dentro de su publicación de radio regulaciones edición 2012 especifica las siguientes bandas de frecuencia asignadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM):

- 13 553-13 567 kHz (frecuencia central 13 560 kHz),
- 26 957-27 283 kHz (frecuencia central 27 120 kHz),
- 40.66-40.70 MHz (frecuencia central 40.68 MHz),
- 902-928 MHz en Región 2 (frecuencia central 915 MHz),
- 2 400-2 500 MHz (frecuencia central 2 450 MHz),
- 5 725-5 875 MHz (frecuencia central 5 800 MHz), y
- 24-24.25 GHz (frecuencia central 24.125 GHz)

Mencionando que los servicios de radiocomunicaciones deben aceptar interferencias perjudiciales que puede ser causada por las diferentes aplicaciones. Para el presente estudio la banda de interés es la de 2 400-2 500 MHz.

El desarrollo de equipos en la banda ISM debe cumplir con estándares, especificaciones de diseño que certifiquen los equipo y cumplan con requerimientos de operación los cuales son establecidos por diferentes entidades reguladoras a nivel internacional entre los cuales se puede mencionar el MIC

(Ministry of Internal Affairs and Communications) en Japón en sus documentos EO(Equipment Ordinance) para Regulación de equipos de Radio Artículo 7, 49.20, 49.21. FCC (Federal Communication Commission) en Estados Unidos en el CFR 47 parte 15, sección 15.205, 15.209,15.247,15.401,15.407, sección 90.210, 90.371 a 90.383. A nivel de Europa se encuentra la CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications), ECC (Electronic Communications Committee) y (ETSI) European Telecommunications Standards Institute en sus documentos ECC DEC (04) 08, ETSI EN 300 328, ETSI EN 301 893, ETSI ES 202 663, ETSI EN 302 571. En china se encuentra el Ministry of Industry and Information technology (MIIT) en sus documentos Xin Bu Wu [2002] #353, Xin Bu Wu [2002] #277. Entre los cuales a continuación se Menciona FCC y ETSI.

2.4.1. FCC

La Comisión Federal de Comunicación FCC mediante el 47 CFR parte 15 regula los niveles de potencia de Transmisión para la Banda ISM en los cuales estipula que el máximo nivel de potencia a la salida del transmisor es de 1 Watt o 30dBm y un Máximo EIRP de 36 dBm debido a la máxima ganancia de la antena que es 6 dBi. Indicando que para el uso de antenas direccionales de ganancia mayores a 6 dBi que se utilizan sobre la banda de 2.4Ghz, la potencia de salida del transmisor disminuirá 1 dB cada aumento de 3 dBi [14]. La Tabla 4 detalla las bandas U-NII con sus respectivos niveles de potencia de transmisión y EIRP máximo permitidos según las regulaciones impuestas por la FCC.

Banda	Uso Permitido	Max. Potencia a la Salida del Transmisor	Max. EIRP
U-NII-1	Indoor	50mW (17 dBm)	23dBm
U-NII-2	Indoor y outdoor	250mW (24 dBm)	30dBm
U-NII-2 Extendida	Indoor y outdoor	250mW (24 dBm)	30dBm
U-NII-3	Indoor y outdoor	1W (30 dBm)	36dBm

Tabla 4: Niveles de potencia de transmisión en las bandas U-NII regulados por la FCC

2.4.2. ETSI

Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones es la entidad regulatoria en Europa y otros países, mediante sus documentos 301 892 [15] y 300 328 [16] indican estándares para el uso de la banda ISM de 2.4 GHz y 5 GHz e implementación WLANs, Bluetooth ZigBee. Para los cuales indica niveles de EIRP Máximo dejando en consideración de fabricantes la ganancia y niveles de potencia a la salida del transmisor, como se presenta en la Tabla 5.

Banda	Uso Permitido	Máx. EIRP
2.4 GHz	Indoor y Outdoor	20 dBm
U-NII-1	Indoor	23 dBm
U-NII-2	Indoor	23 dBm
U-NII-3	Indoor y Outdoor	30 dBm

Tabla 5: Niveles de EIRP regulados por el ETSI

2.5 Tecnologías de Comunicación Inalámbrica

Para la implementación y desarrollo de las diferentes aplicaciones y servicios de redes de sensores inalámbricos WSN para su uso en ciudades inteligentes es necesario tener conocimiento de las diferentes tecnologías que se pueden utilizar

para desplegar aquellas aplicaciones. A continuación, se mencionará aquellas tecnologías que trabajan en la banda ISM de 2.4 GHz, ya que es la banda de interés del presente estudio.

2.5.1. IEEE 802.11

El Protocolo 802.11 utiliza como protocolo MAC el método CSMA/CA. El principio básico del acceso al canal es sensar si el canal está ocupado antes de transmitir datos y si se encuentra libre poder transmitir.

El primer estándar de redes inalámbricas de área local (WLAN) fue aprobado en 1997, IEEE- 802.11 el cual utilizaba dos técnicas de espectro ensanchado, con FHSS podía llegar a Tasas de Datos de 1.2 Mbps y con DHSS podía alcanzar una tasa de Datos de 2 Mbps. Debido a las necesidades de mejoras y una mayor tasa de datos en 1999 se añadió el standard IEEE- 802.11 b utilizando DSSS y modulación CCK para alcanzar tasas de 11 Mbps. Con el desarrollo de las tecnologías en el 2003 se introdujo IEEE 802.11g mediante el uso OFDM permitiendo tasas de Datos de 6,9,12,18,24,36,48 y 54Mbps. Usando 52 sub-portadoras que son moduladas en BPSK, QPSK,16-QAM,64-QAM. Debido al uso de la banda de 2.4 Ghz por los estándares antes mencionados se introdujo IEEE-802.11a que nos permitiría utilizar la banda de 5GHz y así evitar interferencias presentes en la banda de 2.4GHz. En el 2009 se introdujo IEEE-802.11n que utiliza la banda de 2.4GHz y 5 GHz, mejorando su tasa de datos gracias al uso de Sistemas Múltiple Entrada Múltiple Salida MIMO, realizando bonding de frecuencia lo cual se refiere a utilizar un canal de 40 MHz permitiendo llegar a tasas de datos de 600 Mbps.

En la Tabla 6 se exponen los estándares de Wi-Fi, detallando cada una de sus principales características, tales como la técnica de modulación usada, tasas de transmisión que puede alcanzar y su respectiva banda de frecuencia en las que puede operar.

Clase	Tasa de Transmisión	Modulación	Banda de Frecuencia
802.11b	1,2, 5.5 y 11 Mbps	CCK	2.4 GHz
802.11a	6,9,12,18,24,36,49 y 54 Mbps	OFDM	5 GHz
802.11g	Hasta 54 Mbps	CCK/ OFDM	2.4 GHz
802.11n	Hasta 600 Mbps	OFDM	2.4 GHz 5 GHz

Tabla 6: Estándares de la tecnología Wi-Fi

La tasa de datos es una función de la Intensidad de Potencia recibida y SNR. La razón señal a ruido SNR es un valor en unidades dB que nos permite medir el margen de diferencia entre la señal y el piso de Ruido, que es el nivel de Ruido o el promedio de la intensidad de la señal de Ruido [17]. El piso del ruido puede variar dependiendo de los escenarios y la frecuencia. Para la banda ISM de 2.4 GHz el piso de ruido se considera a un nivel de -101 dBm. Para que un Sistema pueda recibir correctamente la información transmitida no es suficiente conocer el nivel de potencia en la recepción, la señal debe cumplir con un SNR mínimo, caso contrario la señal no podrá ser demodulada. En la Tabla 7 se muestran valores de SNR a considerar para las diferentes tasas de transmisión en el estándar 802.11a y 802.11n. En la presente tabla se muestra El SNR mínimo del enlace en el cual se considere el valor de SNR más el FM para 802.11a.

802.11a	
Tasa de Datos [Mbps]	SNR mínimo (SNR+ FM) [dBm]
54	31
48	29
36	26
24	22
18	18
12	16
9	15
6	14

Tabla 7: Características del protocolo 802.11a

La Tabla 8 corresponde al estándar 802.11n, en la cual cómo podemos apreciar las tasas de datos van a depender también del número de canales que se vaya a utilizar para la transmisión.

802.11n		
Tasa de Datos [Mbps]	Número de canales	SNR mínimo (SNR+ FM) [dBm]
300	2	30.3
270	2	29.3
240	2	27.3
180	2	24.3
120	2	20.3
90	2	16.3
60	2	14.3
30	2	12.3
157.5	1	27.3
135	1	26.3
120	1	24.3
90	1	21.3
60	1	17.3
45	1	13.3
30	1	11.3
15	1	9.3

Tabla 8: Características del protocolo 802.11

Debido a las diferentes técnicas de espectro ensanchado que se usa para los estándares desarrollados de 802.11, a continuación, se muestran las diferentes mascarar de transmisión que se pueden obtener.

Máscara de DSSS

La Figura 2.1 muestra la máscara correspondiente a la técnica de modulación DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum).

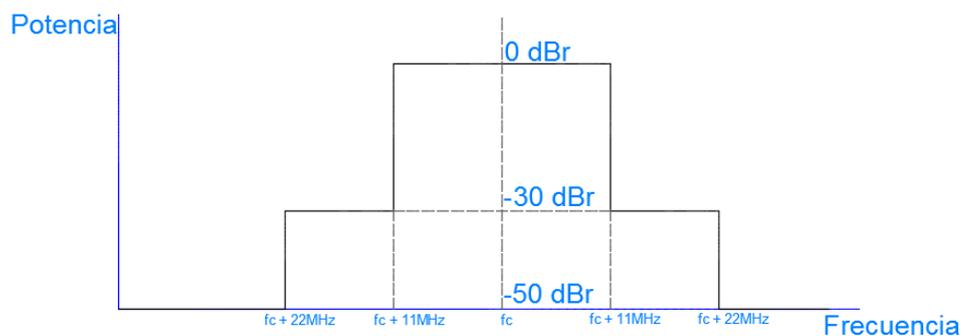


Figura 2.1: Máscara de Wi-Fi por DSSS

Máscara de OFDM

La Figura 2.2 muestra la máscara de la técnica de modulación OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

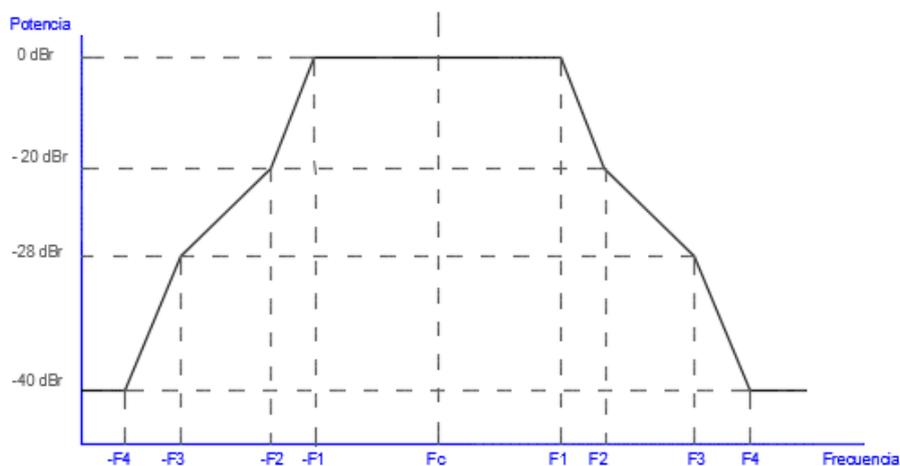


Figura 2.2: Máscara de Wi-Fi por OFDM

Para el uso de OFDM se puede tener anchos de Banda de 20 MHz, 10 MHz y 5 MHz en los cuales los rangos de frecuencia varían para los niveles de potencia permitidos. Para el uso de canales de 20 MHz se debe tener 0dBm en un ancho de banda que no debe exceder 18 MHz, -20 dBm a una frecuencia offset de 11MHz, -28dBm a una frecuencia offset de 20MHz y -40 dBm a una frecuencia offset mayor a 30 MHz. Para el uso de canales de 10 MHz, se debe tener 0 dBm en un ancho de banda que no debe exceder los 9 MHz, -20 dBm a una frecuencia offset de 5.5 MHz, -28dBm a una frecuencia offset de 10 MHz y -40 dBm a una frecuencia offset mayor a 15 MHz. Para el uso de canales de 5 MHz, se debe tener 0 dBm en un ancho de banda que no debe exceder los 4.5 MHz, -20 dBm a una frecuencia offset de 2.75 MHz, -28dBm a una frecuencia offset de 5 MHz y -40 dBm a una frecuencia offset mayor a 7.5 MHz.

2.5.2. Asignación de Canales en la banda de 2.4 GHz

En esta banda el espectro está dividido en 14 canales, los cuales son restringidos de acuerdo a los diferentes entes reguladores. En Europa de acuerdo a ETSI se pueden usar 13 canales, en Japón se puede usar los 14 con limitantes en el último canal, en Estados Unidos y en el cual hacemos referencia de acuerdo a la FCC se encuentran disponibles los primeros 11 canales. Las frecuencias están separadas a 5 MHz como se aprecia en la Figura 2.3. Dependiendo de la técnica de espectro ensanchado el ancho de banda puede ser entre 20 a 22 MHz. Por lo tanto, es de notar que estos canales se traslapan entre sí, por lo que generalmente sugieren usar los canales 1, 6 y 11 tal como se muestra de color rojo en la Figura 2.3. Sin embargo, se puede seleccionar otro tipo de combinaciones de canales para seguir con los lineamientos.

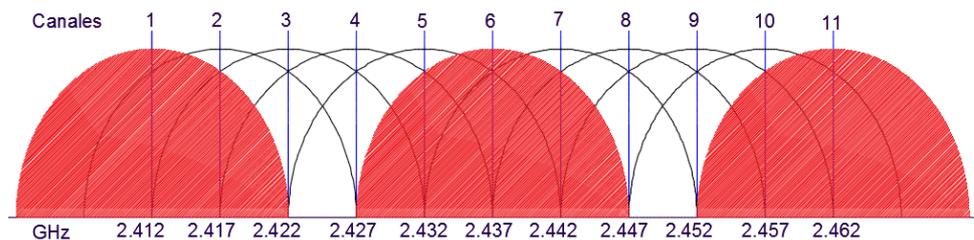


Figura 2.3: Canales de Wi-Fi en la banda 2.4GHz

La ecuación (2.1) nos ayuda a determinar la frecuencia central de cada uno de los canales desde el 1 al 14. En la Tabla 9 se muestran las frecuencias centrales de cada uno de los canales de la tecnología Wi-Fi.

$$\text{Frecuencia Central de Canal } i = 2407 + 5 \times Ci ; [\text{MHz}] \quad (2.1)$$

$$Ci = 1,2 \dots 14$$

Canal	Frecuencia [GHz]
1	2.412
2	2.417
3	2.422
4	2.427
5	2.432
6	2.437
7	2.442
8	2.447
9	2.452
10	2.457
11	2.462
12	2.467
13	2.472
14	2.484

Tabla 9: Frecuencia central de los canales de Wi-Fi

2.5.3. IEEE 802.15.1

El Estándar 802.15.1 Bluetooth está diseñado para comunicaciones inalámbricas de corto alcance y baja potencia de Transmisión. Opera en la Banda ISM de 2.4 GHz en el rango de 2.4 a 2.4835 GHz, dividiéndolo en 79 Canales de 1 MHz de Ancho de banda. Los dispositivos están divididos en tres clases de acuerdo a su rango de cobertura y potencia de transmisión, la Tabla 10 muestra en detalle los valores máximos de los parámetros antes indicados. [18]

Clase	Máy. Potencia de Transmisión	Rango de Operación
1	20 dBm (100mW)	~ 100 m
2	4 dBm (2.5 mW)	~ 10 m
3	0 dBm (1 mW)	~ 1 m

Tabla 10: Características de Bluetooth

Su técnica de modulación se basa en el Espectro Ensanchado por Saltos de Frecuencia (FHSS), variando de manera determinística su frecuencia central realizando 1600 saltos por segundo entre los 79 canales, permitiendo que el sistema sea resistente a degradación de señal a causa de interferencias de otros sistemas. Su sensibilidad es de -70 dBm. La frecuencia central de cada canal es determinada con la ecuación (2.2).

$$f = 2402 + h \text{ (MHz)}; h = 0, 1, \dots, 78 \quad (2.2)$$

Máscara de Transmisión

La Figura 2.4 muestra la máscara de transmisión de la tecnología Bluetooth para redes PAN

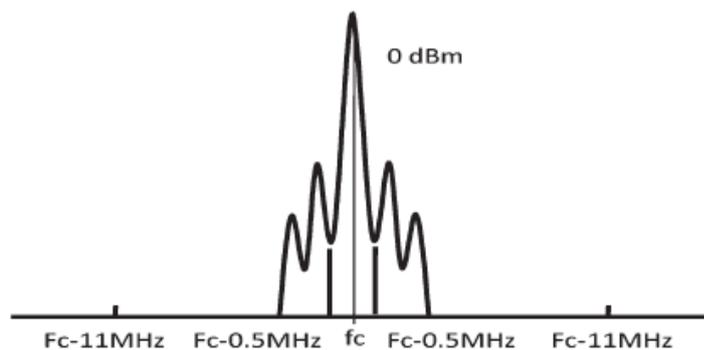


Figura 2.4: Máscara de transmisión de Bluetooth

2.5.4. IEEE 802.15.4 (Zig-Bee)

Zig-bee se basa en el estándar 802.15.4 de la IEEE que define la subcapa MAC y la capa física. Es un estándar inalámbrico para redes de área personal (WPAN). Existen 3 grupos de bandas de Frecuencia, para su despliegue: La banda ISM de 2.4GHz abierta en todo el mundo, 868 MHz en Europa y 915 MHz en Norte América. En la banda de 2.4 GHz se tiene 16 canales (11-26) con un ancho de banda de 2 MHz y separación entre canales de 5 MHz, tal como lo muestra la Figura 2.5. En la banda de 902 a 928 MHz se tiene 10 Canales (1-10) con un ancho de banda de 600KHz y una separación entre Canales de 2 MHz y un Canal (0) en la frecuencia de 868.3 MHz. Las ecuaciones (2.3), (2.4) y (2.5) permiten determinar la frecuencia central de la distribución de los canales en las diferentes bandas.

$$c = 868.3 \text{ MHz, para } c = 0 \quad (2.3)$$

$$Fc = 906 + 2(c - 1)\text{MHz, para } c = 1, 2, \dots, 10 \quad (2.4)$$

$$Fc = 2405 + 5(c - 11)\text{MHz, para } K = 11, 12, \dots, 26 \quad (2.5)$$



Figura 2.5: Canales de Zig-Bee en la banda 2.4GHz

Sobre esta banda se utiliza la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS). La banda de 2.4 GHz es la que prevalece en uso sobre las demás debido a la aceptación, mayor ancho de banda y disponibilidad de esta banda. El estándar 802.15.4 indica que el mínimo nivel de energía a transmitir debe ser de -3 dBm y la sensibilidad mínima en el receptor debe ser de -85 dBm para O-QPSK/ASK y -92dBm para BPSK. En la Tabla 11 se aprecia las tasas de datos que se puede alcanzar en las diferentes bandas de Frecuencias y la modulación que se usa.

Banda	Banda de Frecuencias	Tasa de Transmisión	Modulación
1	868.0-868.6MHz	20/100/250 Kbps	BPSK/ ASK/O-QPSK
2	902.0-928.0MHZ	40/250 kbps	BPSK / ASK / O-QPSK
3	2.40-2.48GHz	250 Kbps	O-QPSK

Tabla 11: Características de Zig-Bee

Máscara de Transmisión

La Figura 2.6 muestra la máscara de transmisión de la tecnología Zig-Bee

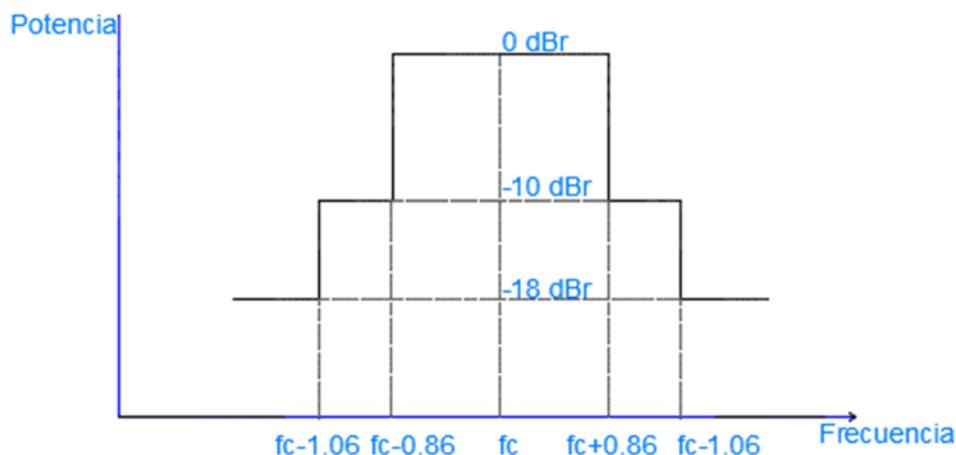


Figura 2.6: Máscara de transmisión de Zig-Bee

2.6 Comparación entre los diferentes estándares

Una vez mencionada las tecnologías que operan en la banda de 2.4GHz es conveniente considerar las opciones que se tiene y cuales resultan entre estas ser las más optimas en los diferentes casos de implementación que se puedan presentar. El Estándar 802.15.4 ZigBee puede ser usado en aplicaciones en las cuales las tasas de datos no requieran ser altas y en las cuales se considere que debe ser fundamental la autonomía del sistema, que involucra el consumo de energía y el tiempo de vida de la batería. Bluetooth es una tecnología con una mínima influencia de interferencia debido a su técnica de transmisión FHSS y permitiendo ser mucho más resistente a las interferencias que se puedan presentar por otros sistemas. Mientras que Wi-Fi (802.11) Es una tecnología que nos permite alcanzar altas tasas de transmisión de datos debido al gran ancho de banda con respecto a las otras tecnologías como se lo ha mencionado por lo cual puede ser seleccionada para aplicaciones de video, voz que requieran altas tasas de datos y no sea de principal importancia el consumo de energía. En un entorno en el cual co-existan estas tecnologías y con una distancia de separación

relativamente cerca, puede resultar en un aumento de la tasa de error de Zigbee debido a que un canal Wi-Fi ocupa el ancho de banda de 4 canales de Zigbee. En la Tabla 12 se compara la tasa de Transmisión, el consumo de Energía y el número de canales que se tiene por cada una de las tecnologías.

Tecnologías	Tasa de Transmisión	Consumo de Energía	Número de Canales
Wi-Fi (802.11)	Alta	Alto	11
Bluetooth	Bajo	Bajo	79
ZigBee	Bajo	Bajo	16

Tabla 12: Comparación de protocolos

2.7 Estudios realizados sobre ocupación del espectro y niveles de interferencia

Debido a la existencia de ciudades dentro de países con un mayor crecimiento socioeconómico y tecnológico, que impulsan al desarrollo e implementación de sistemas inalámbricos que operan en las diferentes bandas del espectro para cubrir las variedades de servicios o aplicaciones que incrementan la demanda del espectro radioeléctrico, se han visto en la necesidad de realizar estudios de ocupación del espectro para análisis de uso eficiente del espectro e introducir nuevas tecnologías o estándares dirigidos a la optimización como lo mencionado anteriormente.

Para lo cual se han realizado estudios en diferentes ciudades como Singapur, Paris, Londres, Oulu, Bogotá y en países como España. Entre los cuales se menciona el estudio de Spectrum Survey in Singapore: Occupancy Measurements and Analysis [19]. Este paper publicado en el 2008 estudia la ocupación del espectro en el rango de frecuencias de 80 MHz a 5850 MHz, realizando mediciones durante 12 días continuos y dividiendo el espectro en 12 banda para tener una mejor visualización de la ocupación del canal, el duty Cycle y Niveles de Potencia. Para la banda ISM de 2.4 GHz y 5 GHz concluye que son banda que no presentan un porcentaje de ocupación y duty Cycle considerable. Esto se debe a factores como el lugar de la toma de los datos que fue en una

terrazza del Institute for Infocomm Research, los niveles de umbral de -98.5 dBm para 2.4 GHz y -100.6 dBm para 5GHz.

El estudio publicado en el 2009 Evaluation of Spectrum Occupancy in Spain for Cognitive Radio Applications [20], en el cual se realizan mediciones en el rango de frecuencias de 75 MHz a 3 GHz en un ambiente urbano en la ciudad de Barcelona y concluye que en el rango de frecuencias de 2000MHz a 2500 MHz se tiene una ocupación del 7.57%.

Spectrum occupancy Measurements and Analysis Methods on the 2.4 GHz ISM Band [21], este estudio publicado en el año 2012 se basa en la medición en 10 diferentes lugares dentro de Oulu, Finlandia. Mediante un umbral para la determinación si el canal está ocupado o no de -96 dBm concluye con un bajo porcentaje de utilización del espectro que va del 0 al 3 %.

Un Estudio Realizado en Bogotá - Colombia en el Año 2013, donde el equipo para la toma de datos se ubicó en una terraza (Octavo piso) de un edificio de la universidad, concluye que la banda de ISM tiene un porcentaje de ocupación del 4%. Debido al debilitamiento de la señal de Routers Wi-fi ubicados en el interior del edificio a causa de paredes y pisos [22].

Con los estudios mencionados anteriormente podemos concluir que los bajos porcentajes de utilización de la banda ISM se debe a que los lugares escogidos para la toma de datos son ubicaciones donde estas señales se ven muy atenuadas. Estas Localizaciones de ambientes outdoor elegidas por los diferentes estudios antes mencionados se centran para análisis de todo el espectro, por lo cual es conveniente realizar un estudio que se centre en la banda ISM, con una localización óptima para poder determinar su uso.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA Y MODELAMIENTO

En los capítulos anteriores se describió el objetivo principal del proyecto, problemática, estado del arte y estudios que se han realizado durante los últimos años acerca de la disponibilidad de los canales de la banda de 2.4 GHz. Mencionado lo anterior se procederá a dar una descripción de los lugares escogidos para realizar la campaña de medición, los equipos, la metodología utilizada y las expresiones matemáticas utilizadas en el análisis realizado sobre las muestras tomadas para obtener los resultados.

3.1 Descripción del Escenario

En el presente estudio, se ha realizado una campaña de medición la cual comprende tres diferentes escenarios: Zona urbana, semi-urbana y residencial. Para lo cual se han seleccionado 3 diferentes sitios que cumplan con las características de los escenarios antes mencionados.

El primer sitio en el cual se realizó la medición cumple con las características de un escenario urbano, ya que está localizado en el centro de la ciudad, ubicado en el casco comercial, rodeado de una variedad de edificios, negocios y departamentos. Como se muestra en la Figura 3.1.

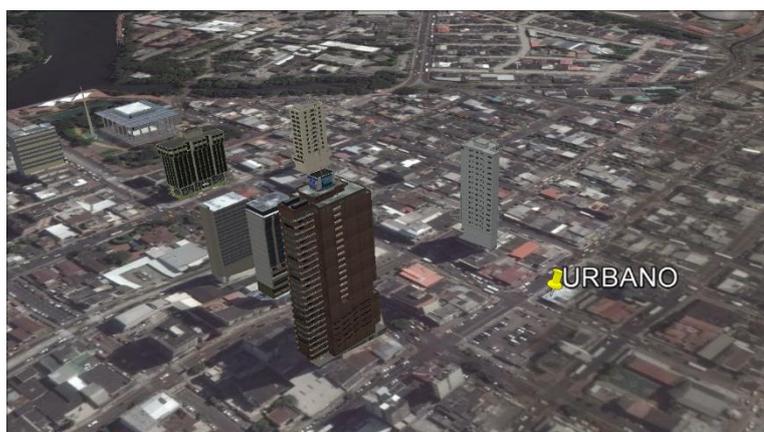


Figura 3.1: Escenario Urbano

El Segundo Sitio se lo realizo en un Campus universitario ya que cumple con las características de ambientes de vegetación con un crecimiento importante de edificaciones. Donde encontramos una combinación de zonas de espacios abiertos y zonas donde se encuentran estructuras arquitectónicas. Como se muestra en la Figura 3.2.



Figura 3.2: Escenario Semi-Urbano

El tercer sitio seleccionado para las respectivas mediciones cumple con las características de una zona residencial. En la cual a su alrededor encontramos señales Wi-Fi de las diferentes WLANs de las residencias alrededor. Como se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Escenario Residencial

En los tres escenarios se ha colocado la antena para la recepción en la parte exterior del sitio, ya que el presente estudio busca obtener características de ambientes externos. Debido a las características respectivas de la propagación de las señales y las características de transmisión de una señal WiFi, estas son muy variantes respecto al tiempo.

La campaña de medición comprende adquisición de muestras en cada uno de estos sitios durante una semana, teniendo como resultado alrededor de 300000 muestras para ser procesados y analizados.

3.2 Metodología aplicada en el escenario

Para realizar la campaña de medición del presente proyecto dentro de los escenarios antes mencionados, se utilizará el sistema de medición conformado por una antena tipo SIRIO, USRP modelo N-210, Cable coaxial RG6/U, Cable Gigabit Ethernet CAT 5E y una computadora para la ejecución del aplicativo, como se muestra en la Figura 3.4.

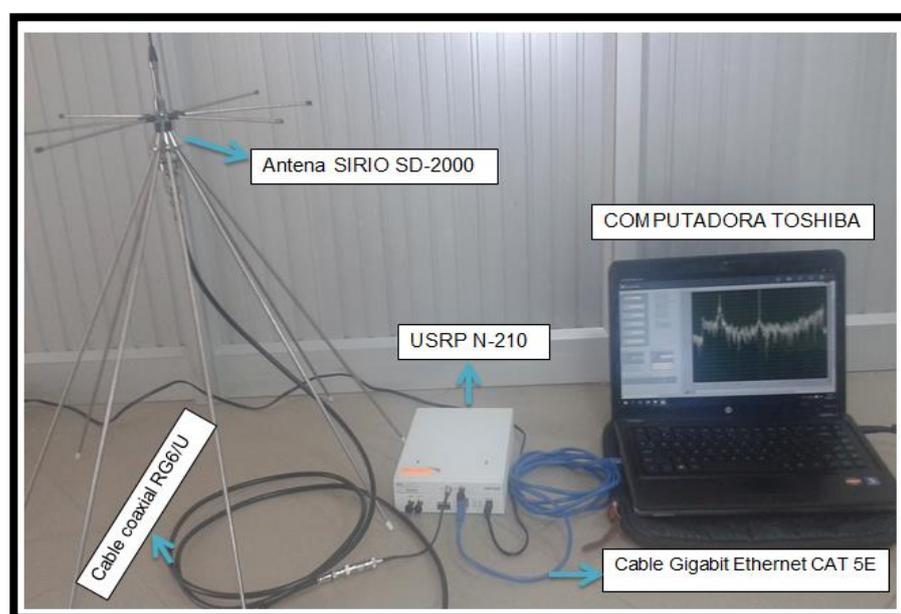


Figura 3.4: Sistema de medición

USRP

El dispositivo utilizado para las mediciones es el USRP modelo N-210 marca Ettus Software, el cual es un equipo de Radio Definido por Software, el cual tiene en su interior instalada la tarjeta SBX, como se muestra en la *Figura 3.5*, que cumple la función de un transceiver que provee hasta 100mW (20 dBm) de potencia de Salida, una Figura de ruido de 5 dB y presenta ganancias variables tanto en el transmisor (0dB-25 dB) como en el receptor (0dB-31.5 dB).. Provee un ancho de banda de 40 MHz. Puede usarse para aplicaciones que trabajen en bandas dentro de 400 MHz a 4400 MHz. Entre los cuales podemos tener Sistemas WiMax y WiFi.



Figura 3.5: Tarjeta SBX

El USRP N-210 tiene una precisión de frecuencia de 50 PPM, un rango de ganancia de salida de 25 dB, un rango de ganancia de 0-31 dB y un ancho de banda en tiempo real de 20 MHz.

Antenas

Para la captura de los datos no solo fue necesario el USRP, sino también el uso de una antena, en donde el tipo y modelo de ella fue seleccionado en base al conjunto de frecuencias que se desean analizar, específicamente nos referimos a la banda de 2.4GHz. Para cumplir con el objetivo se recurrió a la antena SIRIO SD 3000 U/N cuya característica de recepción es de 300-3000MHz, ganancia máxima de 2.15.

3.3 Análisis de los datos

La banda de 2.4GHz es medida mediante el método de detección de potencia para determinar si un canal está siendo ocupado o se encuentra disponible. Con la muestra de niveles de potencia obtenida, es necesario determinar un umbral de detección P_λ . Para determinar el nivel de umbral se considera el nivel de ruido de Nyquist para el rango de frecuencia de operación, la Figura de Merito o conocida también como Figura de Ruido y un valor de SNR mínimo, el cual puede ser calculado con la ecuación (3.1).

$$P_\lambda = P_N + FM + SNR_{min} \quad (3.1)$$

Mediante el Nivel de Umbral considerado se puede determinar que en un determinado canal i ; donde i es un valor entre 1 y 13; una muestra tomada j puede representar que el canal este siendo ocupado o se encuentre libre. Partiendo de esta premisa se realizará una matriz de estados mostrada por la ecuación (3.2), que buscará determinar el estado en cada instante de tiempo.

$$UC_{ij} = \begin{cases} 1; & P_{R_{ij}} \geq P_\lambda \\ 0; & P_{R_{ij}} < P_\lambda \end{cases} \quad (3.2)$$

Si $P_{R_{ij}}$ es mayor o igual a P_λ Se considera que el canal está siendo utilizado $UC_{ij} = 1$, caso contrario el canal se encuentra disponible o libre $UC_{ij} = 0$.

El cálculo para determinar cuánto le toma al equipo hacer un barrido de la banda y tomar una muestra se realiza especificando como datos una granularidad en tiempo de 3 min (180 s) obteniendo un numero de datos $N_s = 105$. La ecuación (3.3) nos permite calcular el tiempo que toma capturar una muestra.

1 muestra \longrightarrow TChij
 105 muestras \longrightarrow 180 s

$$TCh_{ij} = \frac{(1 \text{ muestra})(180 \text{ s})}{105 \text{ muestra}} \quad (3.3)$$

$$TCh_{ij} = 1,709 \text{ s}$$

La granularidad de la disponibilidad se la obtiene con la ecuación (3.4) como se indica a continuación:

$$G_{\text{disponibilidad}} = \frac{1}{N_s} * 100 = \frac{1}{105} * 100 = 0.952 \% \quad (3.4)$$

Mediante la definición de la cantidad de muestras y la matriz de estados se procederá a determinar la disponibilidad de los canales. La ecuación (3.5) nos permite determinar la disponibilidad de un canal i durante un tiempo.

$$DC_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_s} UC_{i,j}}{N_s} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Donde el numerador representa la cantidad de muestras de la matriz de estados y DC_i el promedio, obteniendo así la disponibilidad del canal. Con la siguiente métrica se determina si un canal estará ocupado o disponible en un lapso de tiempo.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Localización geográfica del escenario

Como se describió en el capítulo anterior, las campañas de mediciones se realizaron en tres diferentes sitios.

Para el escenario urbano la antena fue colocada en la parte exterior del primer piso de un edificio ubicado en la zona céntrica de la ciudad.

Para el escenario semiurbano la antena fue ubicada en la parte exterior de los laboratorios de un campus universitario de la ciudad de Guayaquil.

En el escenario residencial la antena fue colocada en la parte exterior de una vivienda residencial de la ciudad de Guayaquil.

La Tabla 13 muestra las coordenadas geográficas donde fueron ubicados los equipos de medición para cada uno de los escenarios.

	LATITUD	LONGITUD
URBANO	-2,187325	-79,892927
SEMI-URBANO	-2,1449611	-79,9671
RESIDENCIAL	-2,149425	-79,908875

Tabla 13: Coordenadas geográficas de los escenarios

4.2 Parámetros de Configuración

Para la toma de datos se utilizó el USRP con los parámetros indicados en la Tabla 14, los cuales fueron configurados para cada uno de los escenarios. Para la obtención de los datos se hizo un barrido de la banda en canales con un ancho de banda de 5 MHz. El umbral definido es de -85 dBm.

PARÁMETROS DE RADIOFRECUENCIA	
IQ rate /Ancho de Banda del canal (Δf)	5 MHz
Frecuencia Inicial (CH1)	2.405G
Frecuencia Final (CH14)	2.490 G
Gain del USRP (GUSRP)	20 dB
Número de Canales (N-Ch)	17
Número de muestras (Nm)	105
Potencia umbral (λ)	-85 dBm
Tiempo de muestra por canal (Ts)	1,709 s

Tabla 14: Parámetros de configuración

4.3 Análisis de los Resultados

Mediante los datos obtenidos de acuerdo a lo mencionado en el capítulo 3, en el presente capítulo se procederá a detallar el análisis de los resultados obtenidos con el fin de determinar la disponibilidad y el comportamiento de los 13 canales que se consideraron para la banda ISM de 2.4GHz.

4.3.1. Análisis temporal de los datos

El análisis temporal de los datos se determinó en base a los datos capturados mediante el USRP durante una semana, con lo cual se puede analizar el comportamiento de cada uno de los canales de la Banda ISM de 2.4GHz en los diferentes escenarios descritos.

Análisis de Señales por Canales Potencia vs Tiempo

➤ Canal 1

Como se aprecia en la Figura 4.1 la señal captada en el escenario urbano presenta niveles de potencia muchos más altos y una mayor variación, lo que nos indica que el Canal uno es mucho más utilizado con respecto a los otros dos escenarios. Para el escenario residencial se observa que los niveles de potencia decrecen hasta valores inferiores a -95dB.

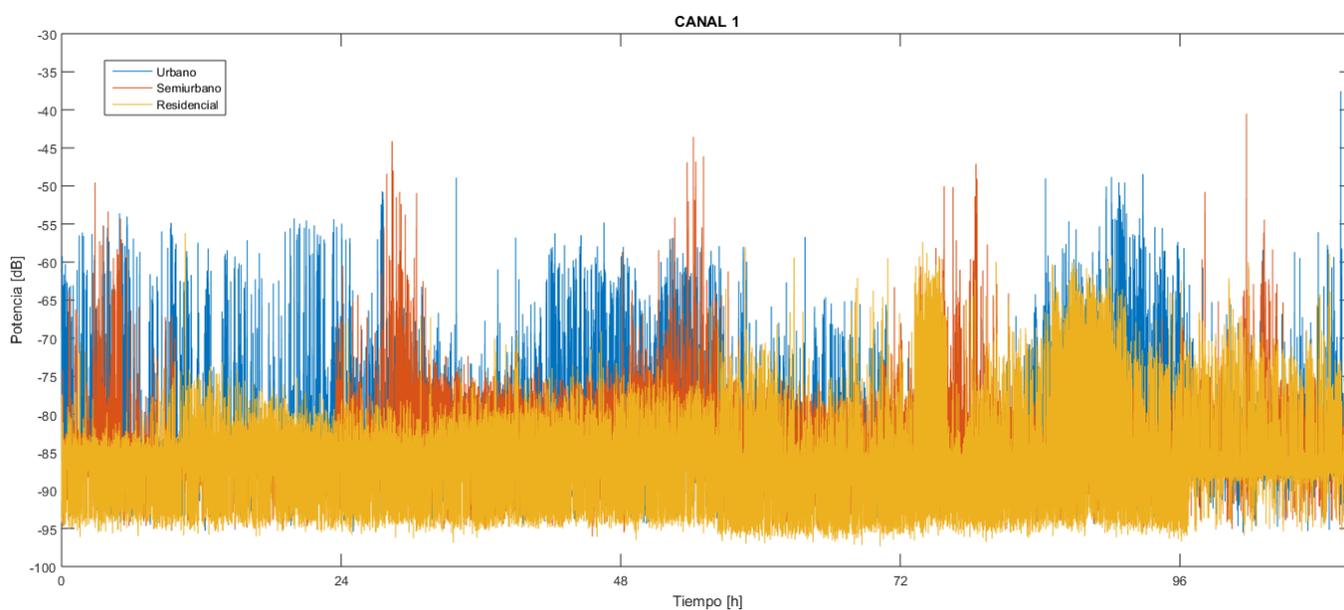


Figura 4.1: Potencia vs Tiempo (Canal 1)

➤ **Canal 2**

Como se aprecia en la Figura 4.2 la señal captada en el escenario urbano al igual que en el Canal uno presenta niveles de potencia muchos más altos y una mayor variación, lo que nos indica que el Canal dos es más utilizado con respecto a los otros dos escenarios. Sin embargo, los niveles de potencia entre los escenarios Residencial y Semiurbano son muy similares.

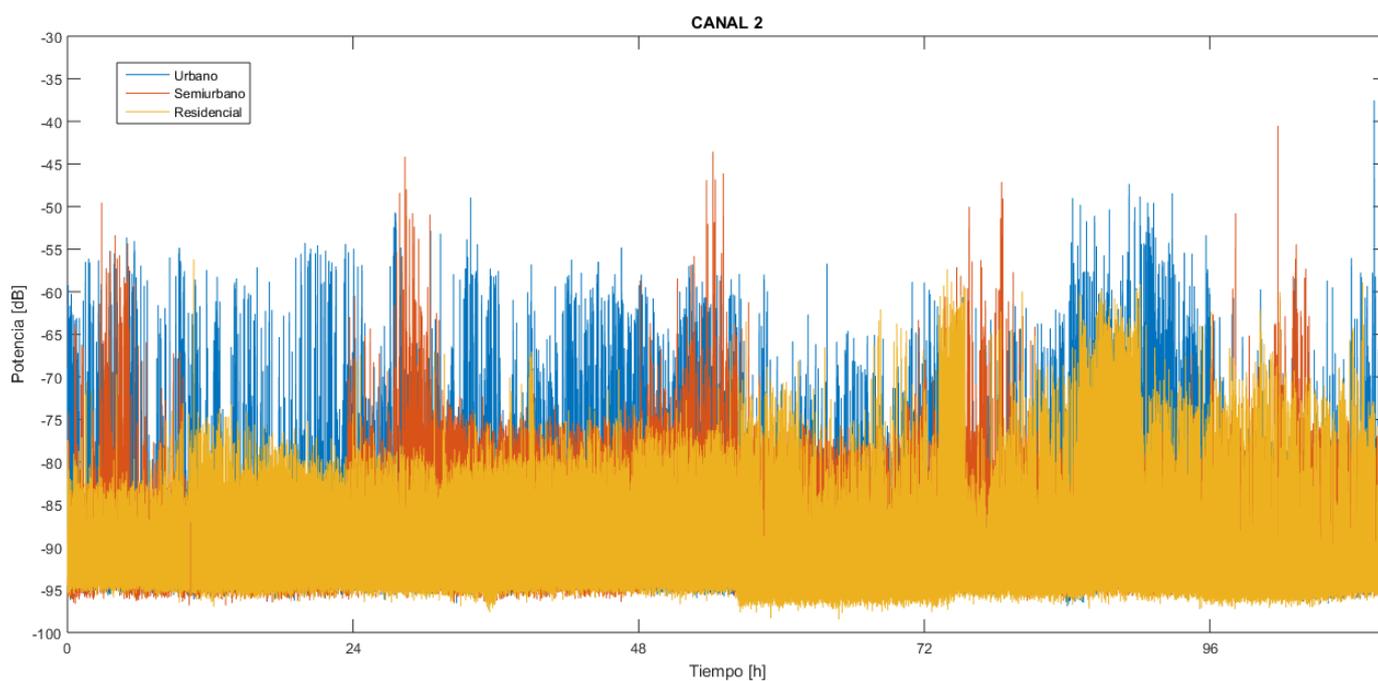


Figura 4.2: Potencia vs Tiempo (Canal 2)

➤ **Canal 3**

Como se aprecia en la Figura 4.3 la señal captada en el escenario urbano presenta mayores niveles de potencia en el tiempo, lo cual nos indica que existe un mayor nivel de interferencia que en los otros dos escenarios.

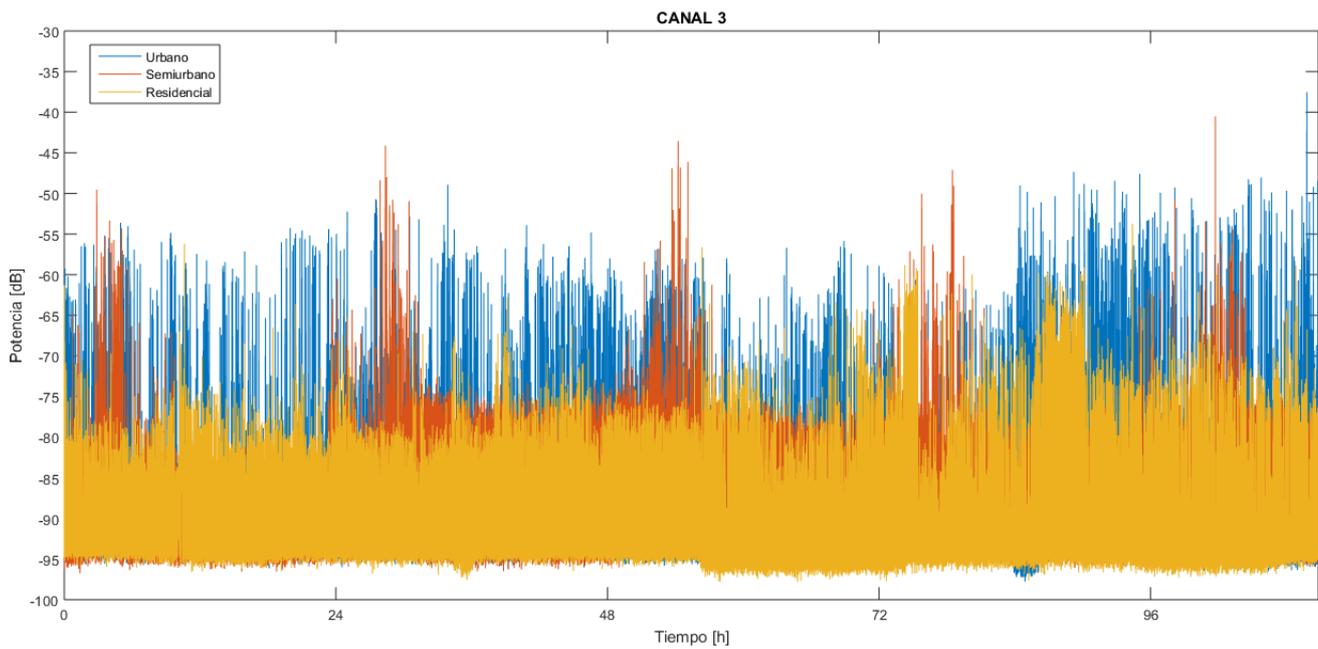


Figura 4.3: Potencia vs Tiempo (Canal 3)

➤ **Canal 4**

Como se aprecia en la Figura 4.4 la señal captada en el escenario urbano presenta niveles de potencia muchos más altos. Sin embargo, se observa menores variaciones en el tiempo. Los niveles de potencia para el Escenario Residencial disminuyen con respecto a los escenarios anteriores. La señal del escenario Semiurbano oscila entre -75 dB a -95 dB con ciertos picos.

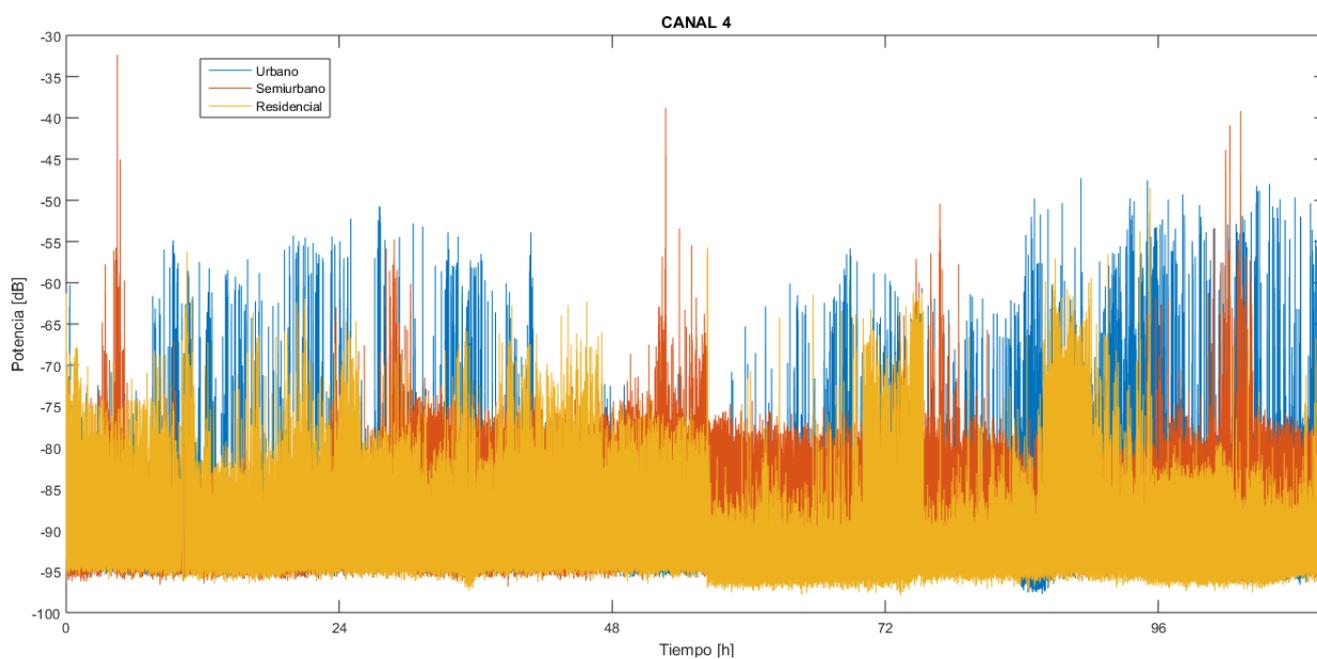


Figura 4.4: Potencia vs Tiempo (Canal 4)

➤ **Canal 5**

Como se aprecia en la Figura 4.5 la señal en el escenario residencial muestra un crecimiento de los niveles de potencia captados. Sin embargo, se puede observar que el canal en el escenario urbano presenta mayor variación, presentando en instantes picos de -50 dB. En la señal del Escenario Semiurbano presenta picos más altos que el resto de escenarios.

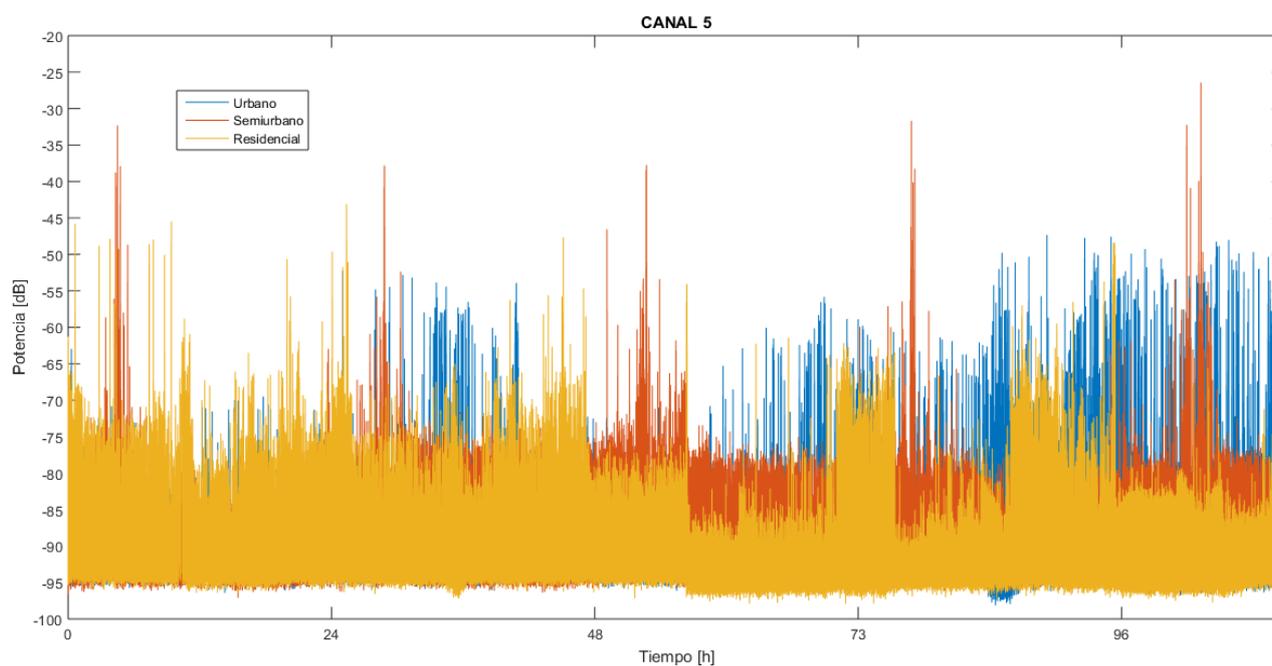


Figura 4.5: Potencia vs Tiempo (Canal 5)

➤ **Canal 6**

Como se aprecia en la Figura 4.6 los niveles de potencia en el escenario urbano son menores a la de los canales antes mencionados, lo cual nos indica que existe una menor concentración de dispositivos sobre este canal. Mientras que en el Escenario Residencial se puede observar que hay una mayor concentración de dispositivos debido a los niveles de potencia que se observa.

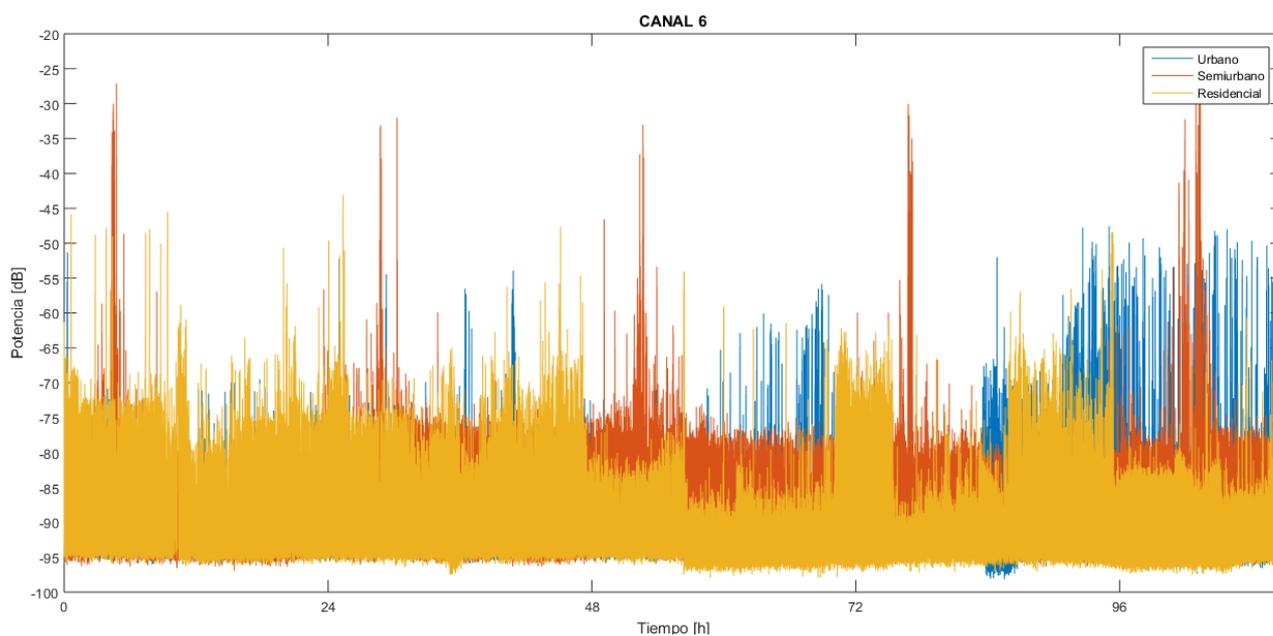


Figura 4.6: Potencia vs Tiempo (Canal 5)

➤ **Canal 7**

En la Figura 4.7 se aprecia que existe un incremento de los niveles de potencia en la señal del escenario Semiurbano, para el escenario Residencial se mantiene. Los niveles de potencia para el escenario Urbano disminuyen notablemente. Lo cual indica que El Escenario semiurbano presenta una mayor concentración de dispositivos sobre este canal.

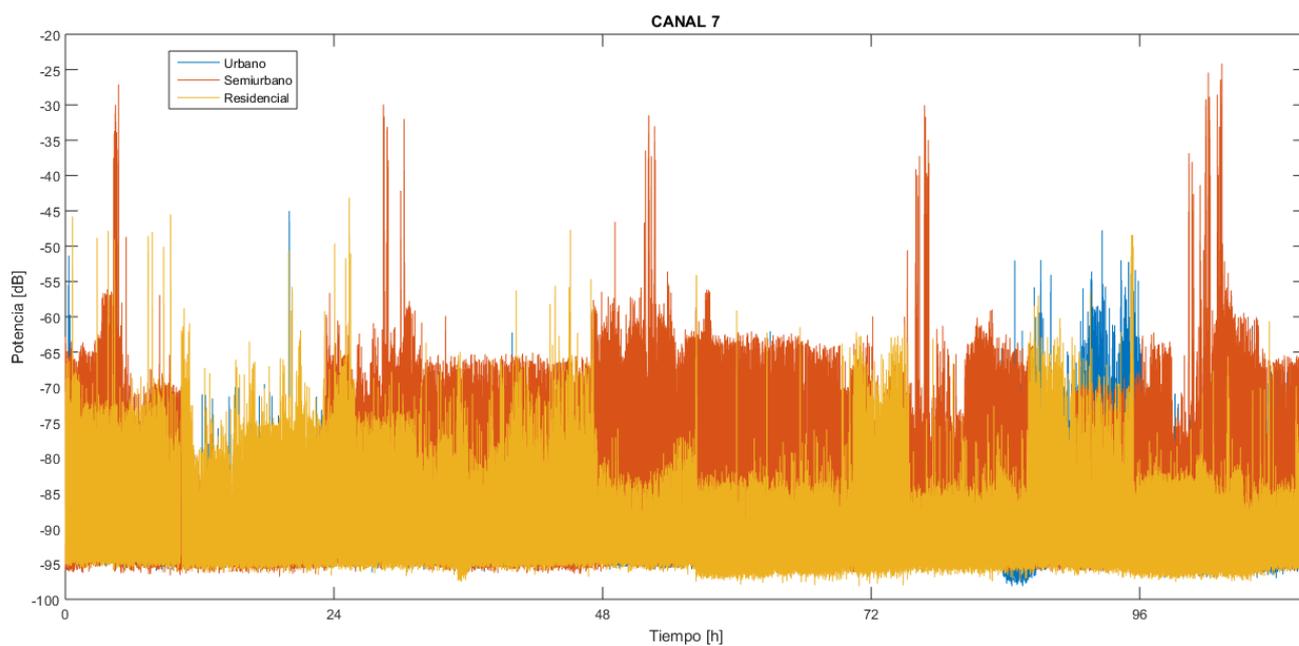


Figura 4.7: Potencia vs Tiempo (Canal 7)

➤ **Canal 8**

En la Figura 4.8 se aprecia que existe un incremento de los niveles de potencia en la señal del escenario Semiurbano y residencial. Los niveles de potencia para el escenario urbano disminuyen notablemente. Comparando los diferentes Escenarios, el escenario de mayores niveles de potencia es el Semiurbano con Picos mayores a -30dBm .

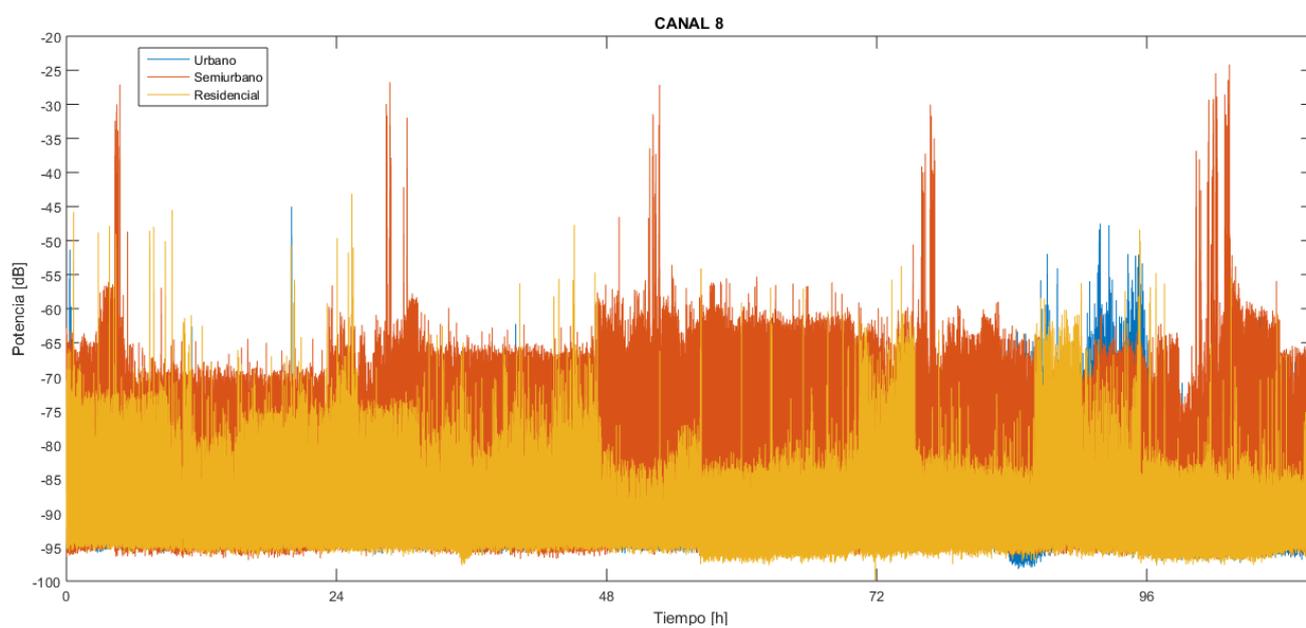


Figura 4.8: Potencia vs Tiempo (Canal 8)

➤ **Canal 9**

En la Figura 4.9 se aprecia que los niveles de potencia para el escenario Semiurbano son muchos más altos comparados a los demás escenarios. Lo cual indica que este canal está siendo más utilizado que en los demás Escenarios.

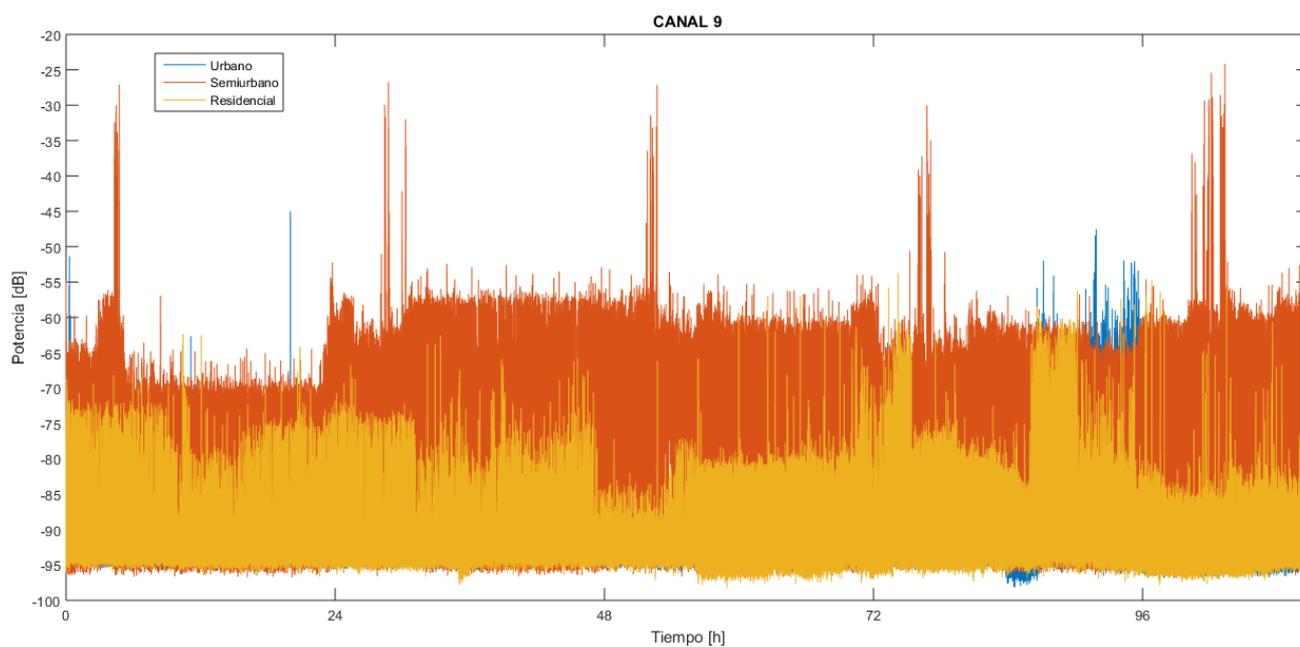


Figura 4.9: Potencia vs Tiempo (Canal 9)

➤ **Canal 10**

En la Figura 4.10 se aprecia que los niveles de potencia para el Escenario Semiurbano son mucho más altos comparados a los demás escenarios, observando una gran cantidad de datos dentro del rango de -55dBm a -65dBm . Los niveles de potencia para el escenario Residenciales oscilan entre -75dBm a -95dBm .

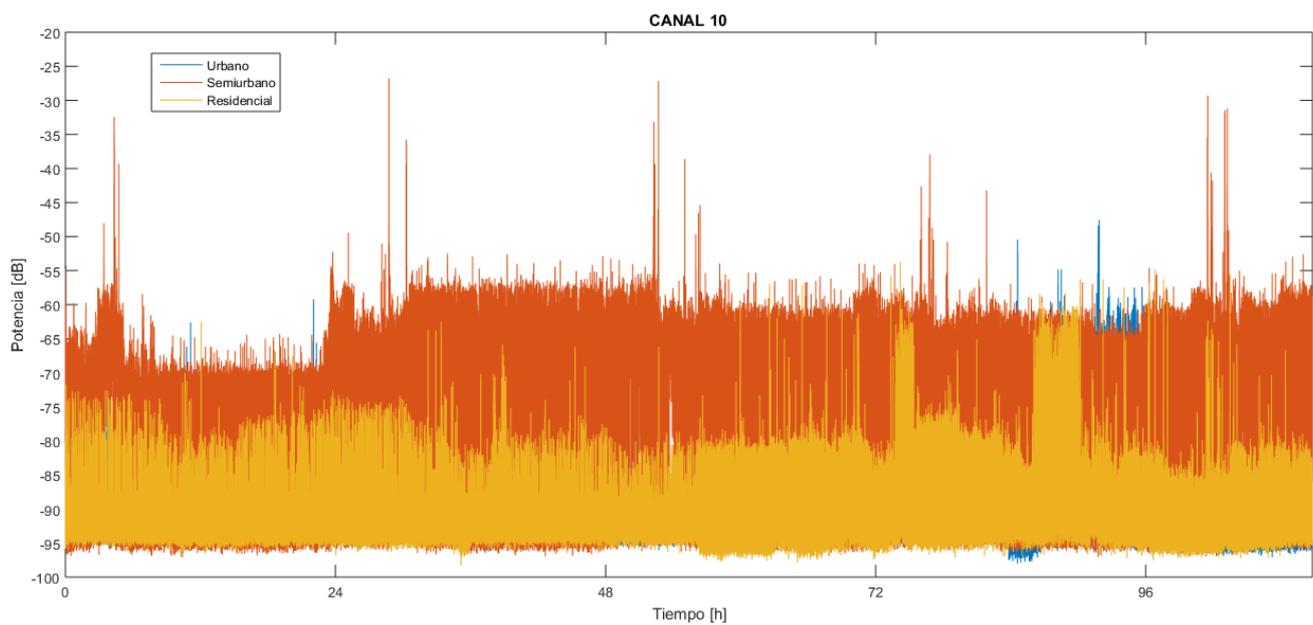


Figura 4.10: Potencia vs Tiempo (Canal 10)

➤ **Canal 11**

En la Figura 4.11 se aprecia que los niveles de potencia para el escenario Semiurbano son muchos más altos comparados a los demás escenarios. Observando una gran cantidad de datos entre el rango de -55dBm a -65dBm. Los niveles de potencia para el escenario Residenciales oscilan entre -80dBm a -95dBm.

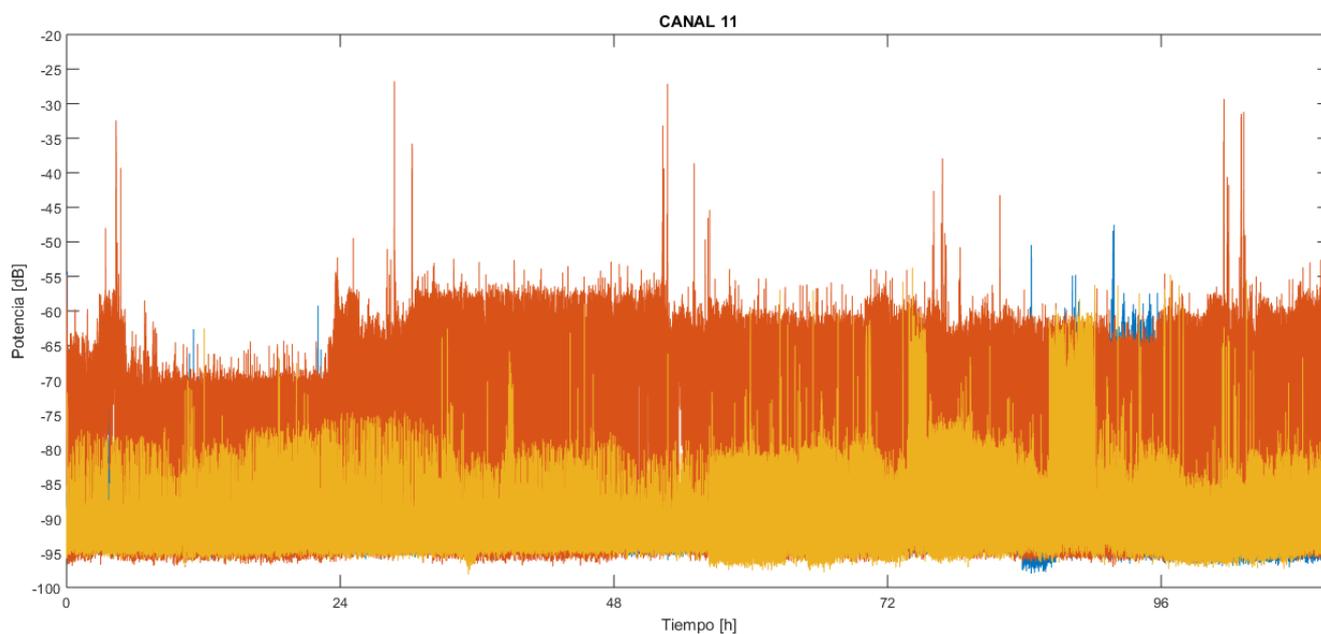


Figura 4.11: Potencia vs Tiempo (Canal 11)

➤ **Canal 12**

En la Figura 4.12 se aprecia que los niveles de potencia para el escenario Semiurbano son mucho más altos comparados a los demás escenarios. Lo cual indica que hay una mayor concentración de dispositivos en este canal. Los niveles de potencia para el escenario Residenciales oscilan entre -80dBm a -95dBm existiendo picos que alcanzan los -60dBm.

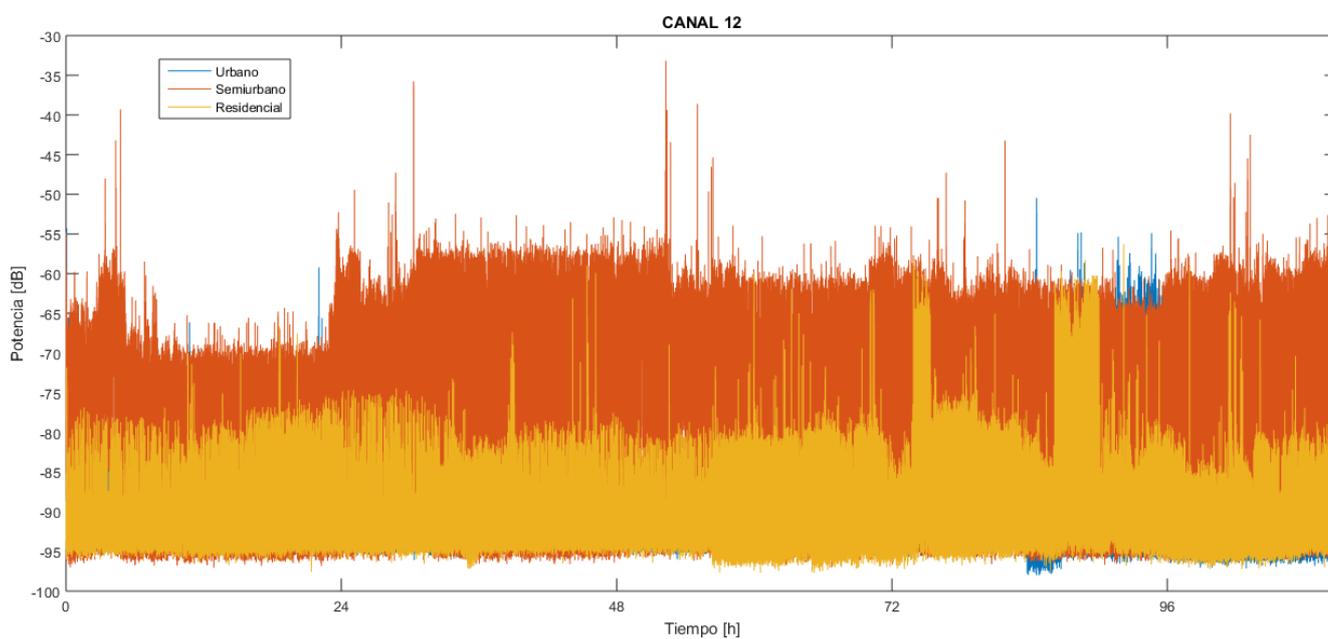


Figura 4.12: Potencia vs Tiempo (Canal 12)

➤ **Canal 13**

En la Figura 4.13 se aprecia que los niveles de potencia para el escenario Semiurbano son más altos comparados a los demás escenarios. Lo cual nos indica que para el Escenario semiurbano los canales superiores son los más prestos a ser utilizados y donde puede existir mayores niveles de interferencia.

Los niveles de potencia para el escenario Residenciales oscilan entre -80dB a -95dB existiendo picos que alcanzan los -60 dB.

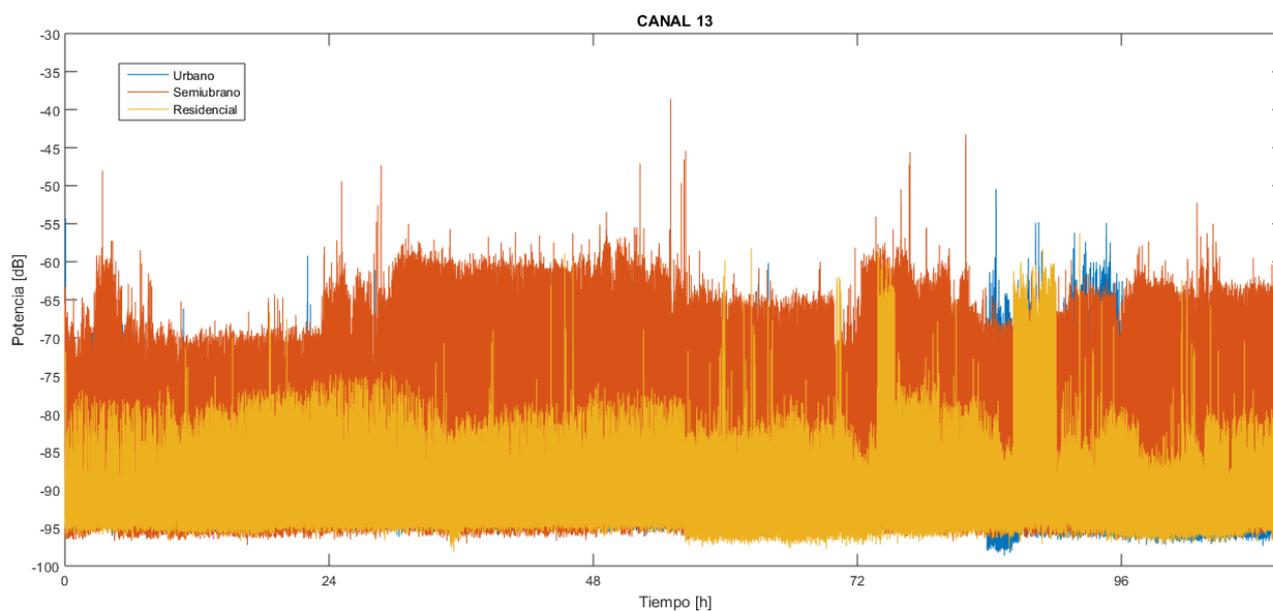


Figura 4.13: Potencia vs Tiempo (Canal 13)

Análisis de la Función CDF por Canales

➤ Canal 1

La Figura 4.14 nos muestra que en el escenario urbano y semi-urbano la media de los niveles de potencias está por encima de nuestro umbral definido. En el escenario residencial la mayoría de las potencias capturadas dentro del canal 1 estuvieron por debajo del umbral de -85dBm, esto siendo representado por un 81%, con lo que se evidencia una gran disponibilidad.

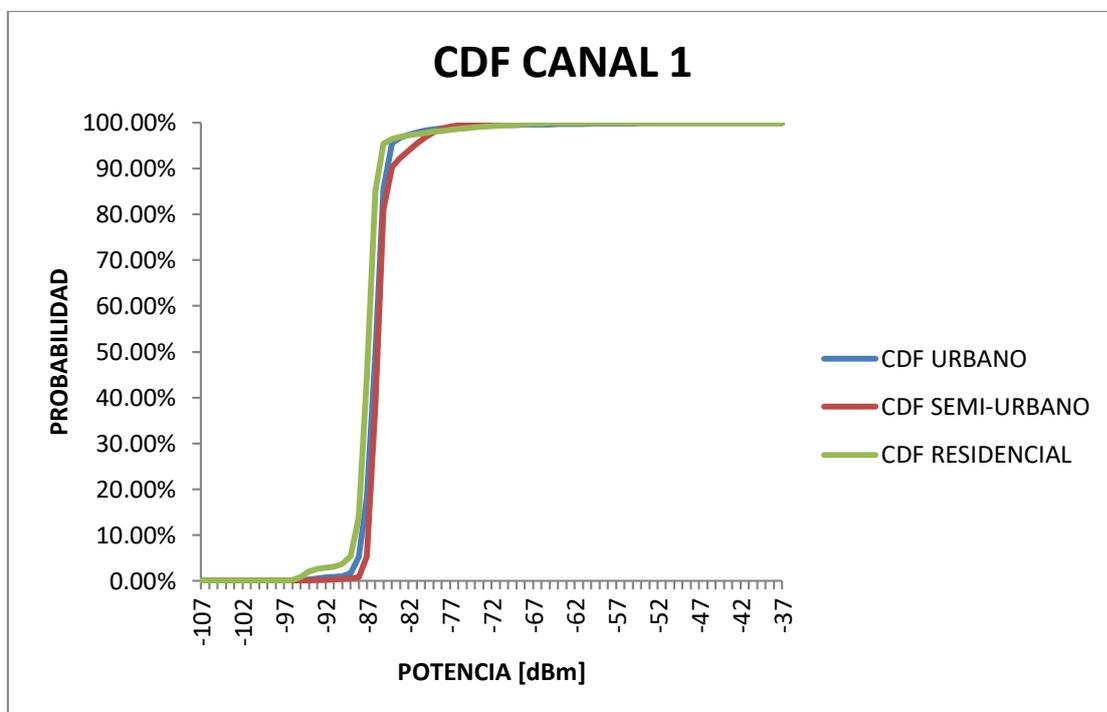


Figura 4.14: Función CDF del Canal 1 en los tres escenarios

➤ **Canal 2**

En la Figura 4.15 se aprecia que el escenario residencial pasa más tiempo desocupado en relación a los otros dos escenarios, ya que la mayor parte de sus datos están distribuidos por debajo del umbral propuesto.

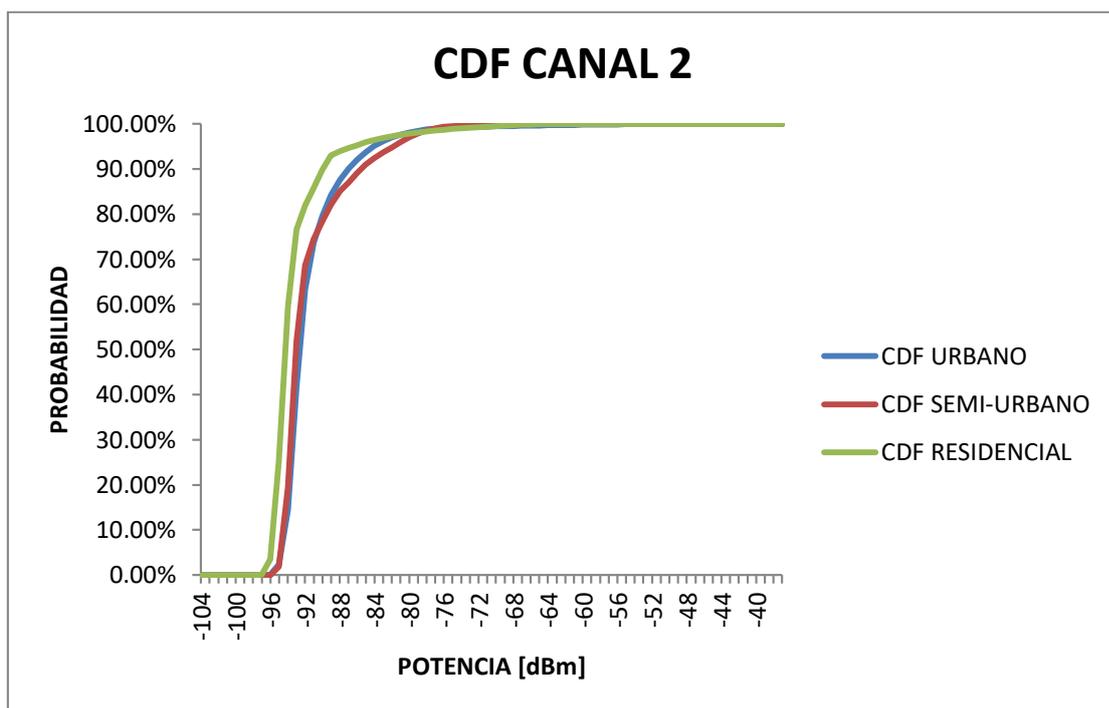


Figura 4.15: Función CDF del Canal 2 en los tres escenarios

➤ **Canal 3**

En la Figura 4.16 se observa que en el escenario semi-urbano existe una mayor aportación de niveles de potencia que está sobre el umbral, además este canal presenta un comportamiento similar que el Canal 2.

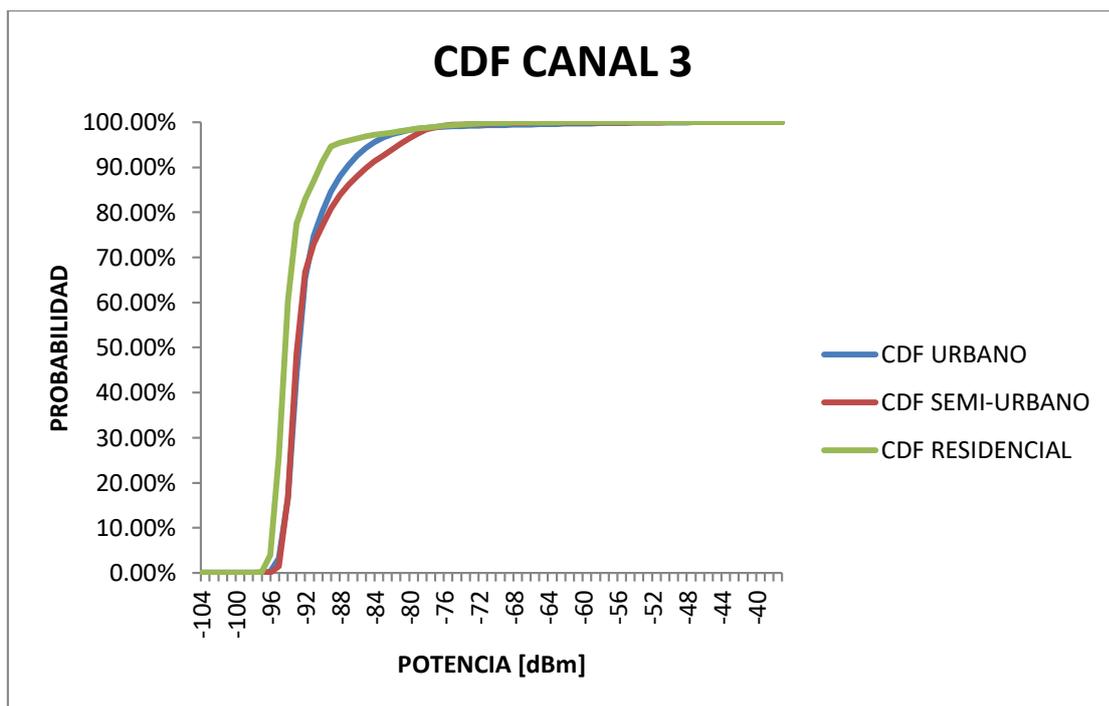


Figura 4.16: Función CDF del Canal 3 en los tres escenarios

➤ **Canal 4**

La Figura 4.17 muestra claramente que menos del 98% de los niveles de potencia recibidos en el escenario residencial están por debajo del umbral, con lo cual se presencia gran disponibilidad de este canal 4.

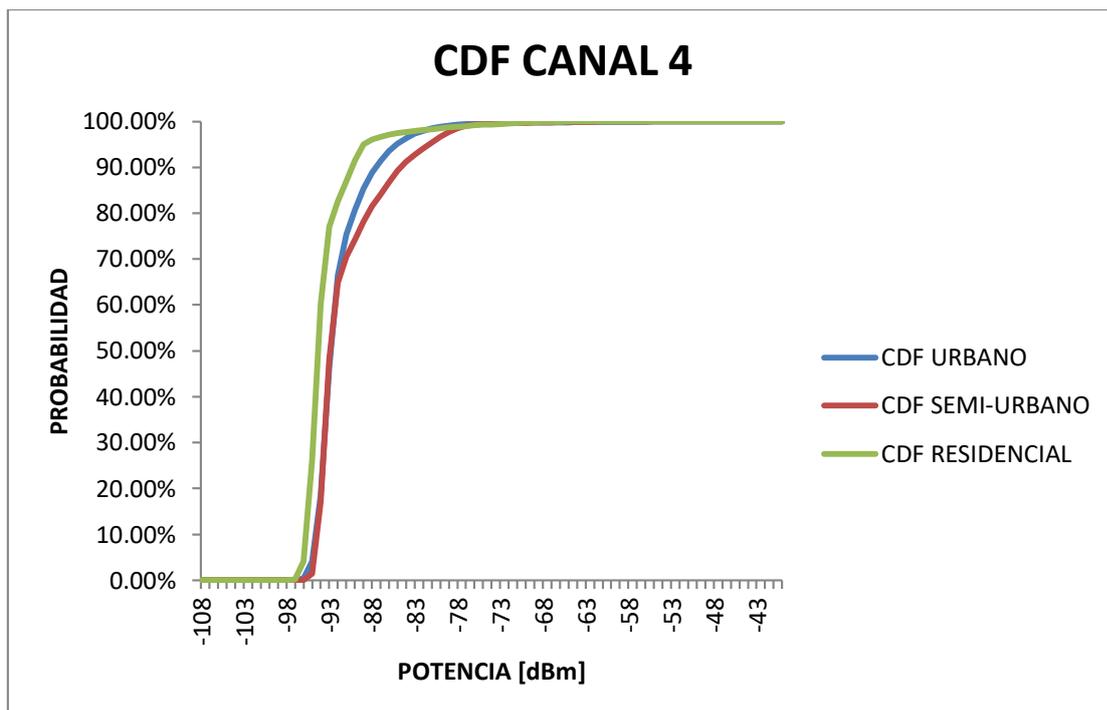


Figura 4.17: Función CDF del Canal 4 en los tres escenarios

➤ **Canal 5**

En la Figura 4.18 se aprecia que para los escenarios urbano y residencial es escaso el acceso a recursos Wi-Fi, ya que en la mayoría de muestras no sobrepasa el umbral definido.

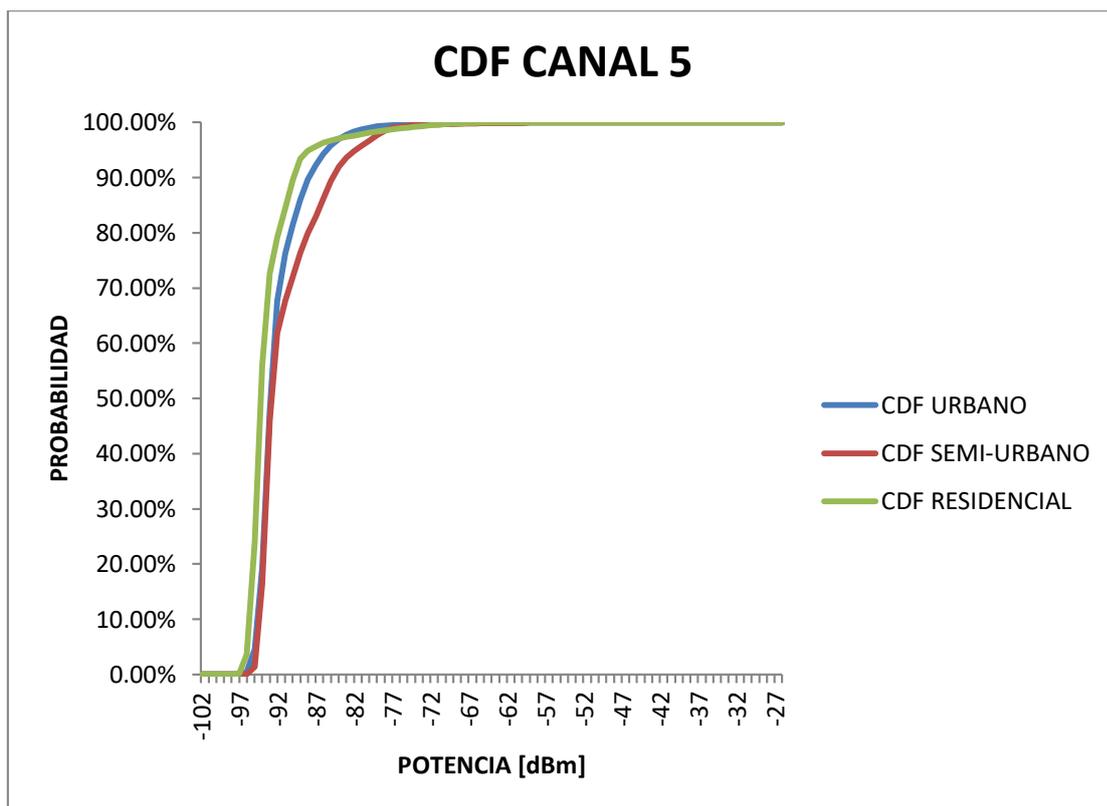


Figura 4.18: Función CDF del Canal 5 en los tres escenarios

➤ **Canal 6**

En la Figura 4.19 observamos que los niveles de potencia presentes en el canal 6 han empezado a incrementar en relación a los niveles de los canales anteriormente analizados, con lo cual se puede decir que ya existe una mayor participación de usuarios sobre este canal.

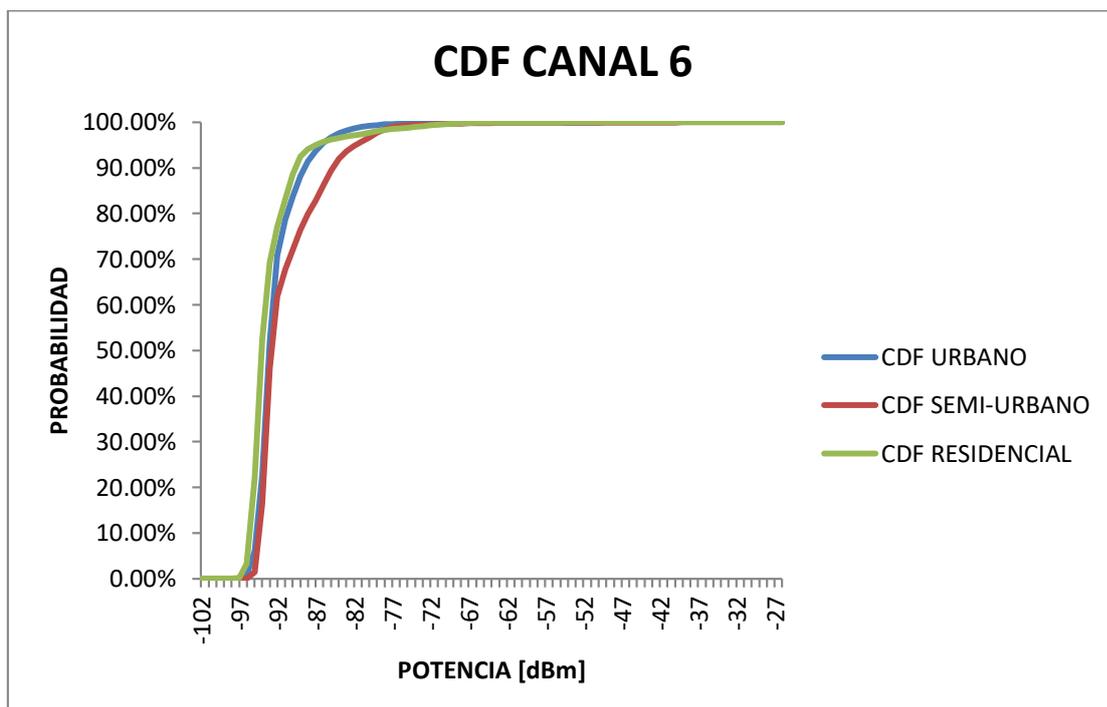


Figura 4.19: Función CDF del Canal 6 en los tres escenarios

➤ **Canal 7**

La Figura 4.190 muestra que en el escenario semi-urbano existe una elevada cantidad de datos que se encuentran alrededor de potencias mayores al umbral.

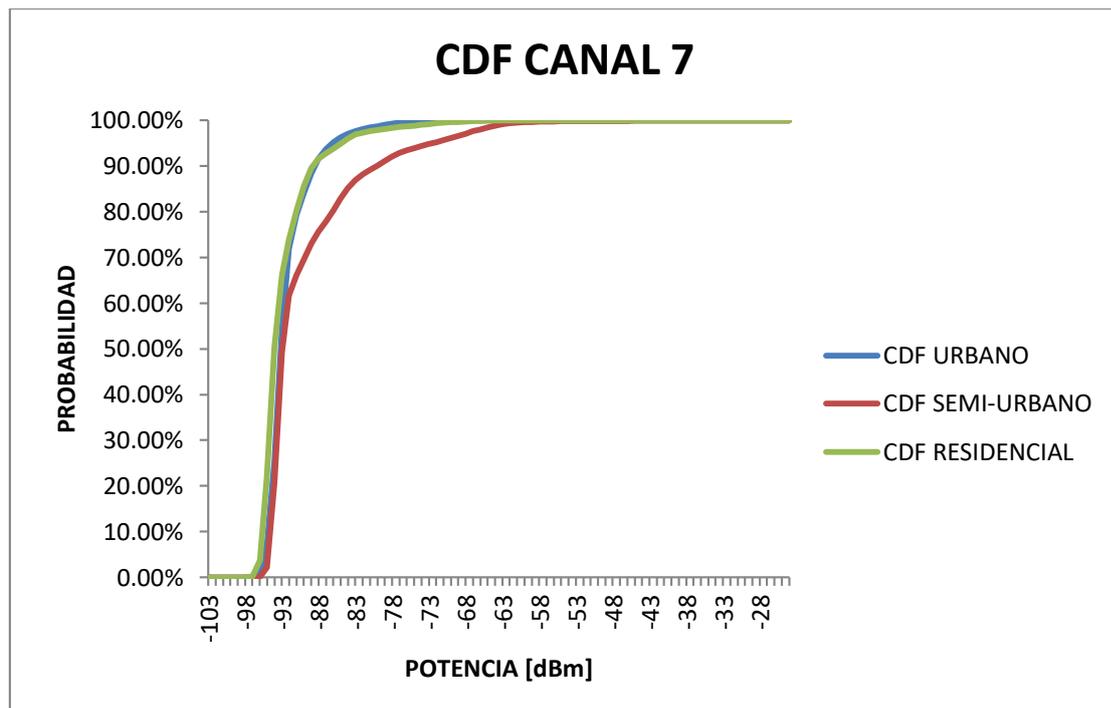


Figura 4.20: Función CDF del Canal 7 en los tres escenarios

➤ **Canal 8**

En la Figura 4.21 se observa que los niveles de potencia recibida para el escenario residencial han sufrido incremento, haciendo que dicho canal se encuentre más ocupado. En el caso del escenario semi-urbano se evidencia que el canal está siendo altamente usado, debido a que la PDF engloba una gran porción de datos con potencias mayores a -85dBm .

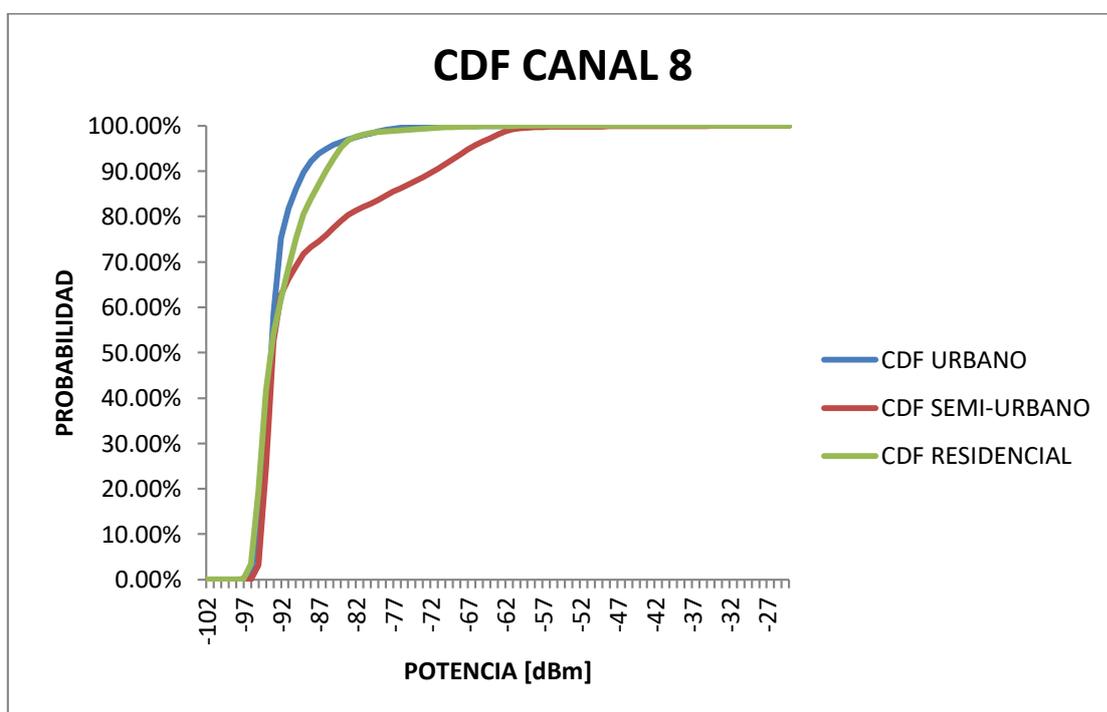


Figura 4.21: Función CDF del Canal 8 en los tres escenarios

➤ **Canal 9**

En la Figura 4.22 para el escenario semi-urbano se evidencia una mayor contribución de señales con niveles de potencia significativos, ya que menos del 30% del total de potencias capturadas son mayores al umbral establecido, lo cual indica que el canal está siendo usado periódicamente; además se aprecia que en el escenario urbano no existe mucha actividad.

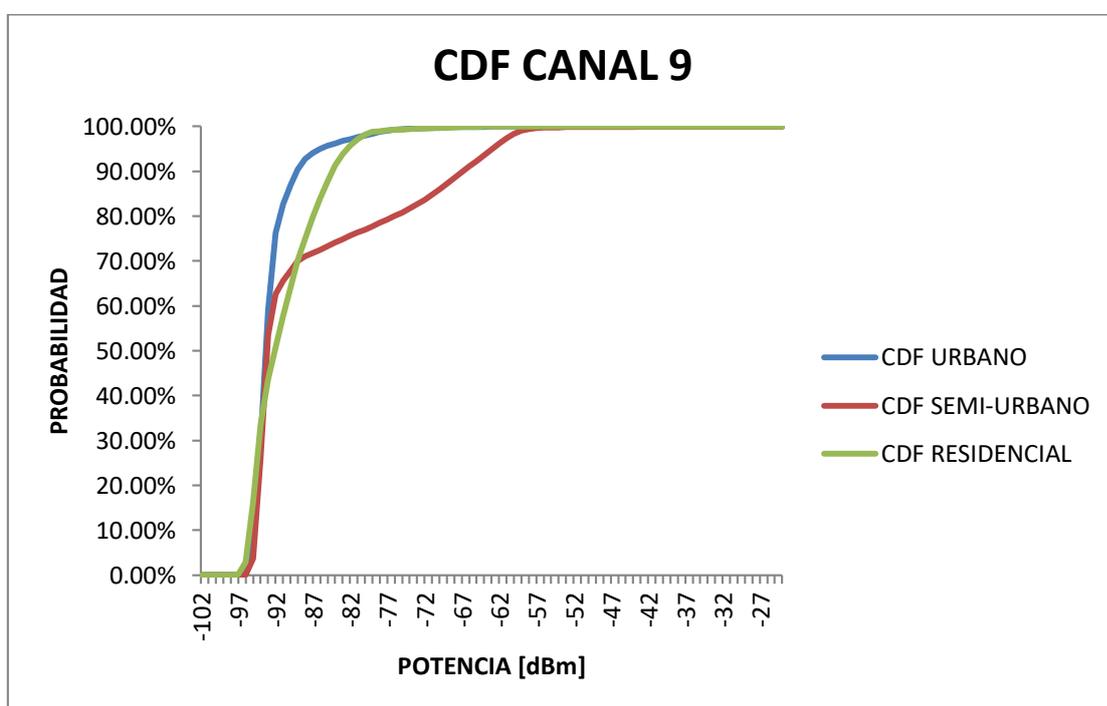


Figura 4.22: Función CDF del Canal 9 en los tres escenarios

➤ **Canal 10**

La Figura 4.23 muestra que en los tres escenarios existe gran ocupación del canal 10, siendo los escenarios semi-urbano y residencial los más ocupados.

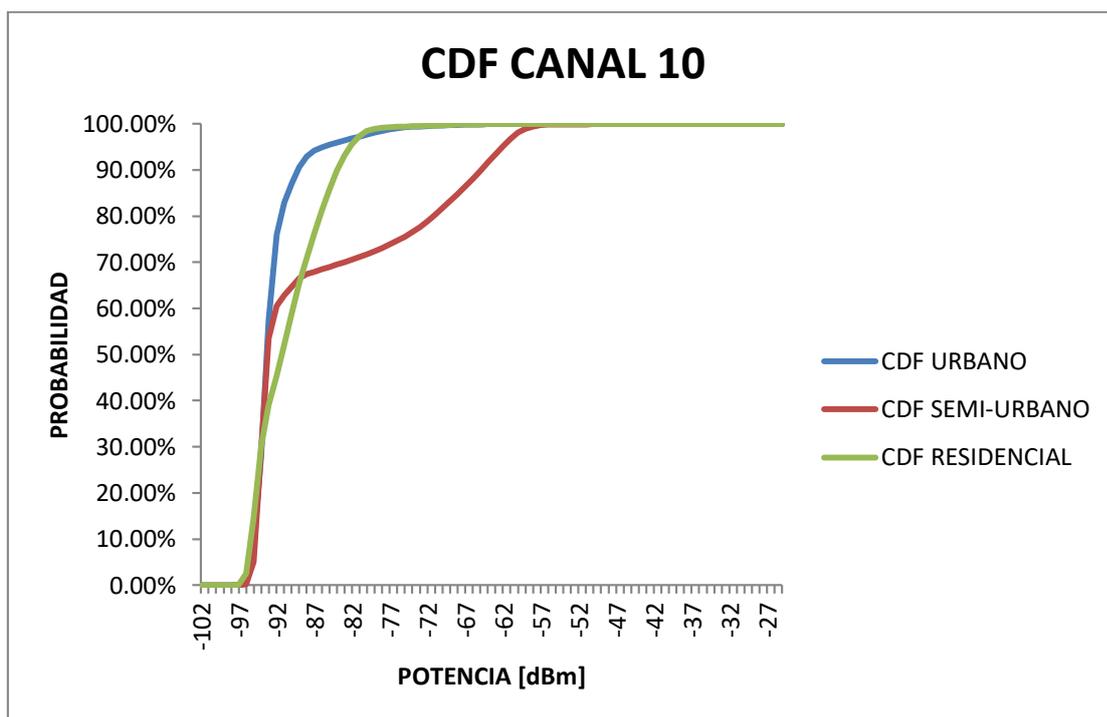


Figura 4.23: Función CDF del Canal 10 en los tres escenarios

➤ **Canal 11**

En la Figura 4.24 se observa para el escenario semi-urbano continúa la presencia de elevados niveles de potencia que representan la ocupación del canal 11.

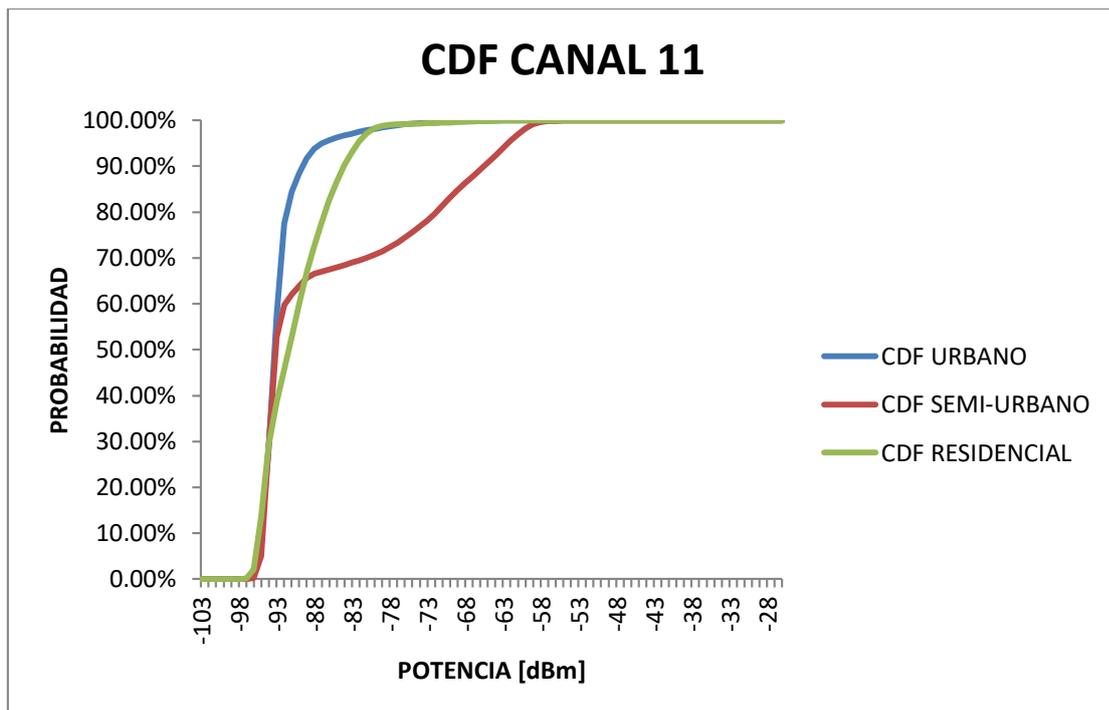


Figura 4.24: Función CDF del Canal 11 en los tres escenarios

➤ **Canal 12**

De la Figura 4.25 se evidencia que tanto el escenario residencial y semi-urbano tienen una gran aportación de señales con potencias que indican que el canal está siendo utilizado.

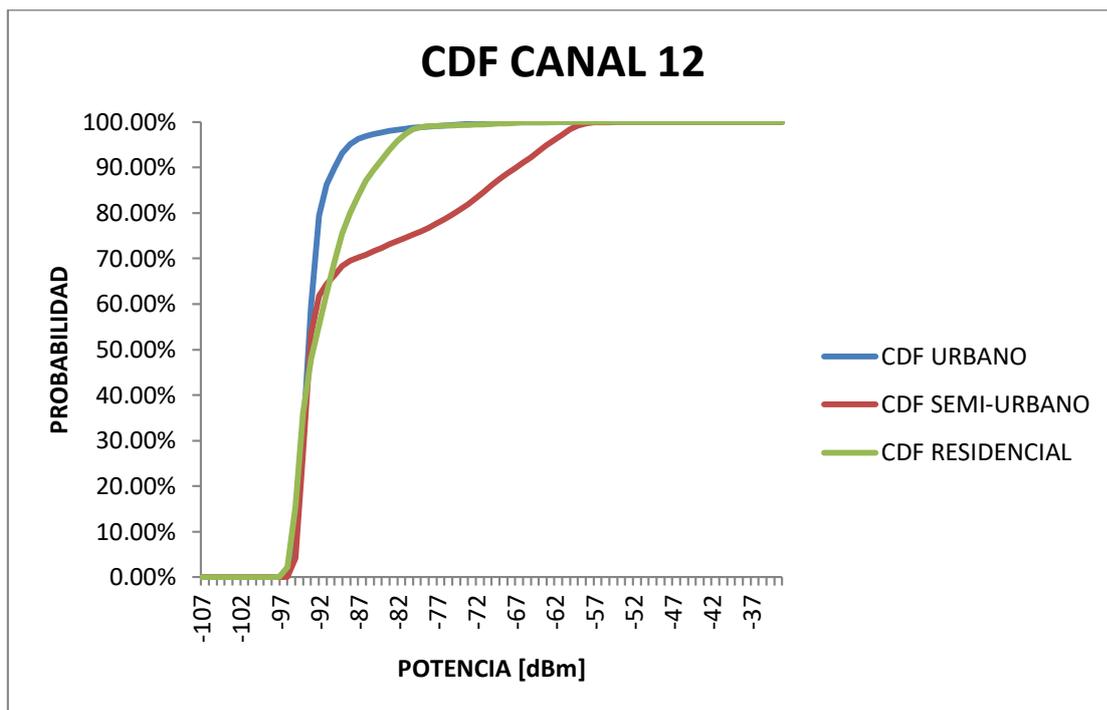


Figura 4.25: Función CDF del Canal 12 en los tres escenarios

➤ **Canal 13**

En la Figura 4.26 se muestra que más del 20% de las potencias recibidas en el escenario semi-urbano pueden ser consideradas como indicadores de que el canal se encuentra activo.

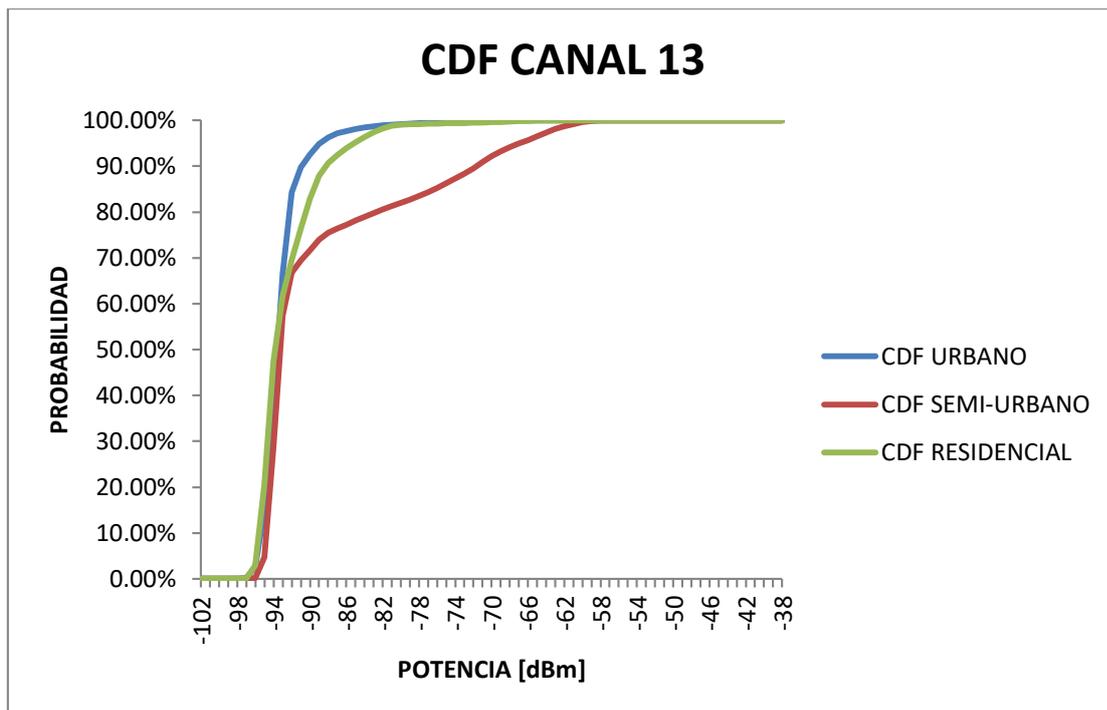


Figura 4.26: Función CDF del Canal 13 en los tres escenarios

Espectrograma de Niveles de Potencia

En las Figura 4.27, Figura 4.28 y Figura 4.29 se muestran los niveles de potencia contra el tiempo para los diferentes escenarios en los cuales se realizaron las mediciones, como se puede observar para el escenario urbano Figura 4.27 existen niveles de potencia muy altos entre los canales del 1 hasta el 7 y en los demás canales existen ráfagas de tiempo en los cuales se aprecia que los canales están siendo utilizado en lapsos de tiempo.

Para el escenario semiurbano Figura 4.28 se observa que hay un mayor uso de los canales a partir del séptimo como se aprecia de acuerdo al Espectrograma de Potencias con color celeste y verde. Para los canales inferiores a los mencionados se observa que las potencias son inferiores a -80dB de acuerdo a los colores de tonalidad azul y durante cierto periodo de tiempo podemos observar tonalidades de color verde.

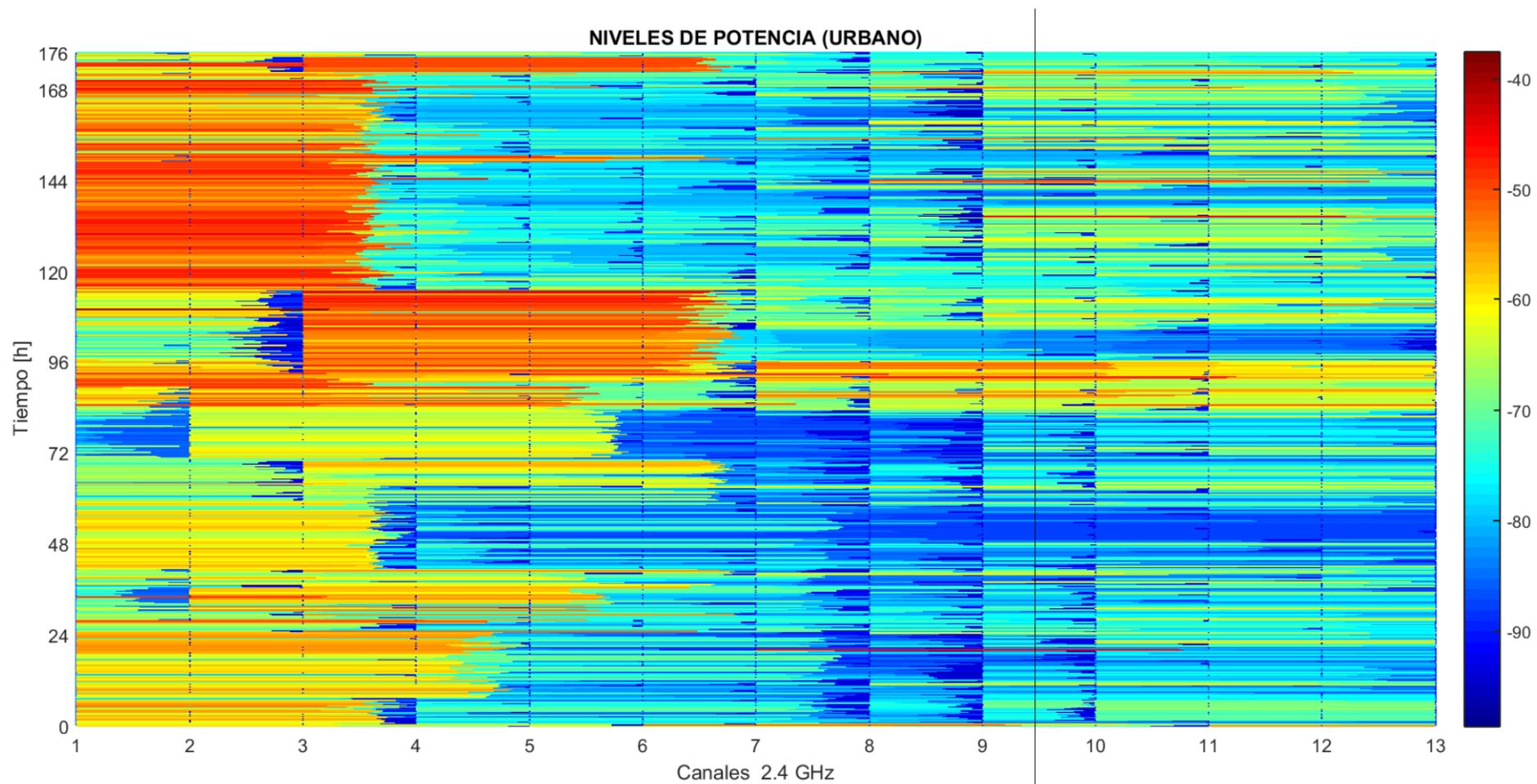


Figura 4.27: Espectrograma de escenario Urbano

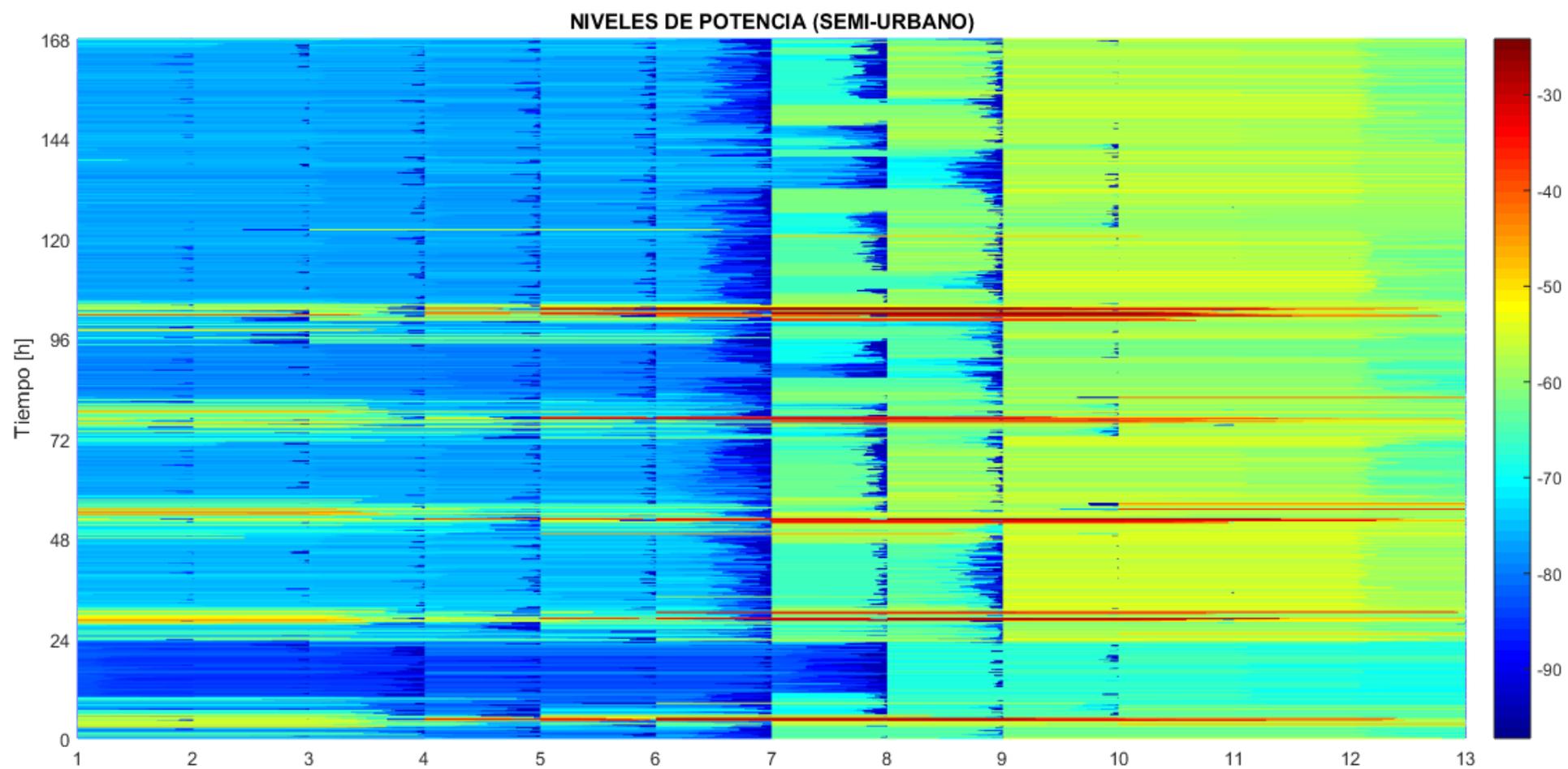


Figura 4.28: Espectrograma de escenario Semi-Urbano

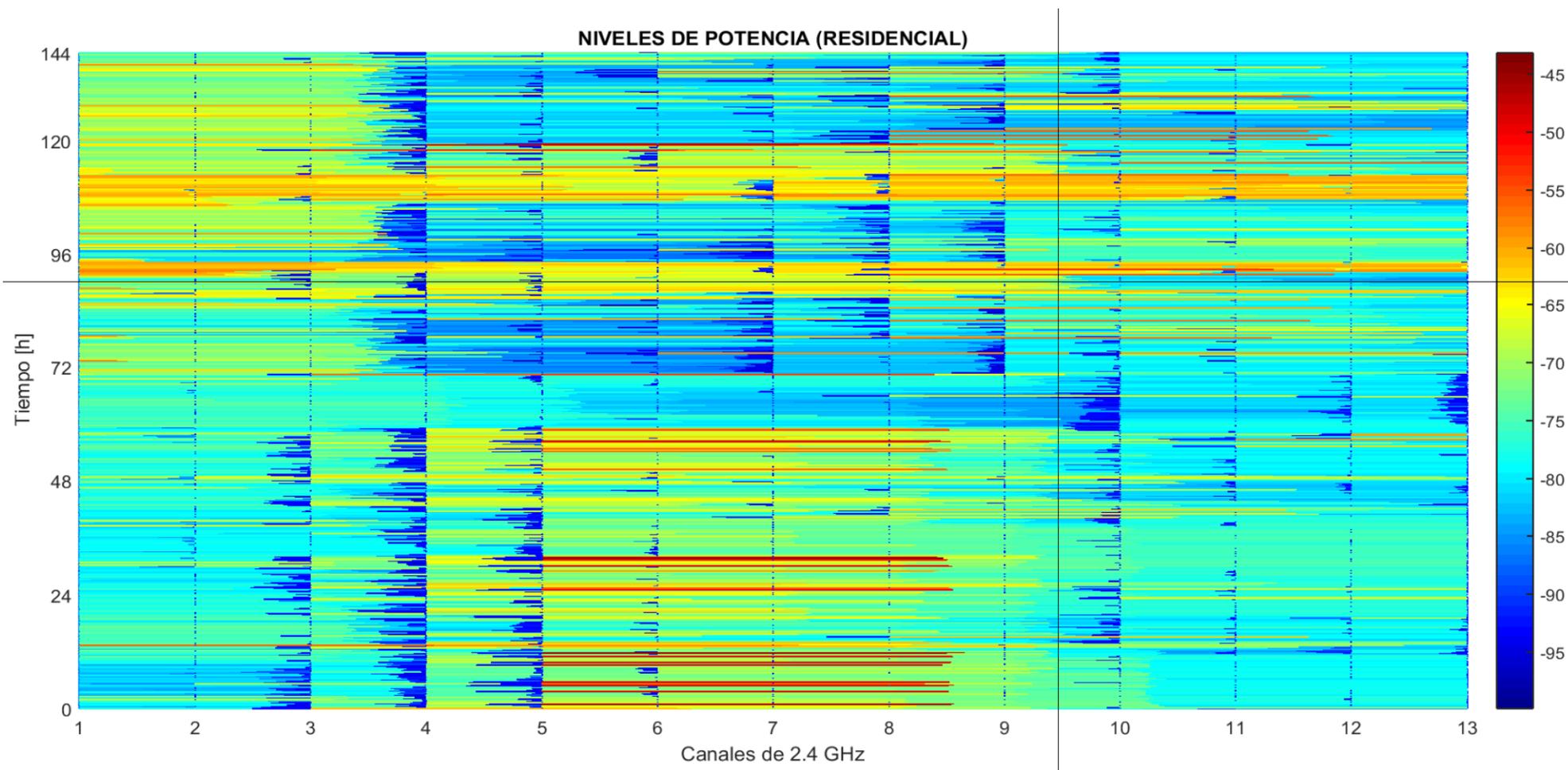


Figura 4.29: Espectrograma de escenario Residencial

4.3.2. Disponibilidad

De acuerdo a lo descrito en el capítulo 3 las mediciones fueron agrupadas cada 3 minutos para cuantificar porcentualmente la disponibilidad y un resultado complementario que nos permita analizar los datos desde otra perspectiva.

Las Figura 4.2, Figura 4.2 y Figura 4.2 representa la gráfica de Disponibilidad de los diferentes canales de la banda ISM de 2.4GHz, para determinar la disponibilidad en la parte derecha se puede observar una escala de colores que nos permite identificar el porcentaje de disponibilidad de un determinado canal un color próximo al 0 indica que el canal está disponible en determinado lapso de tiempo y los colores aproximados a uno indican que el canal está siendo ocupado. De acuerdo a lo mencionado previamente para el análisis de la banda en la zona urbana se puede observar que para el canal uno existe una mayor ocupación en el tiempo, lo cual nos indica que el canal va a presentar mayores niveles de interferencias en el tiempo. Para los demás existen un nivel de ocupación entre 0.3%, 0.6% alrededor de las 72 a 96 horas. En los demás espacios de tiempo se observa que hay una alta disponibilidad. Para el escenario semiurbano existen espacios de tiempo en el cual el canal se ve muy ocupado, como se lo menciono en las gráficas de potencia quienes presentan una mayor ocupación son los canales a partir del 7. Sin embargo, la disponibilidad es muy variante como se observa que durante ciertos momentos el canal no se muestra muy ocupado, con lo cual puede existir niveles de interferencia que afecten a las comunicaciones.

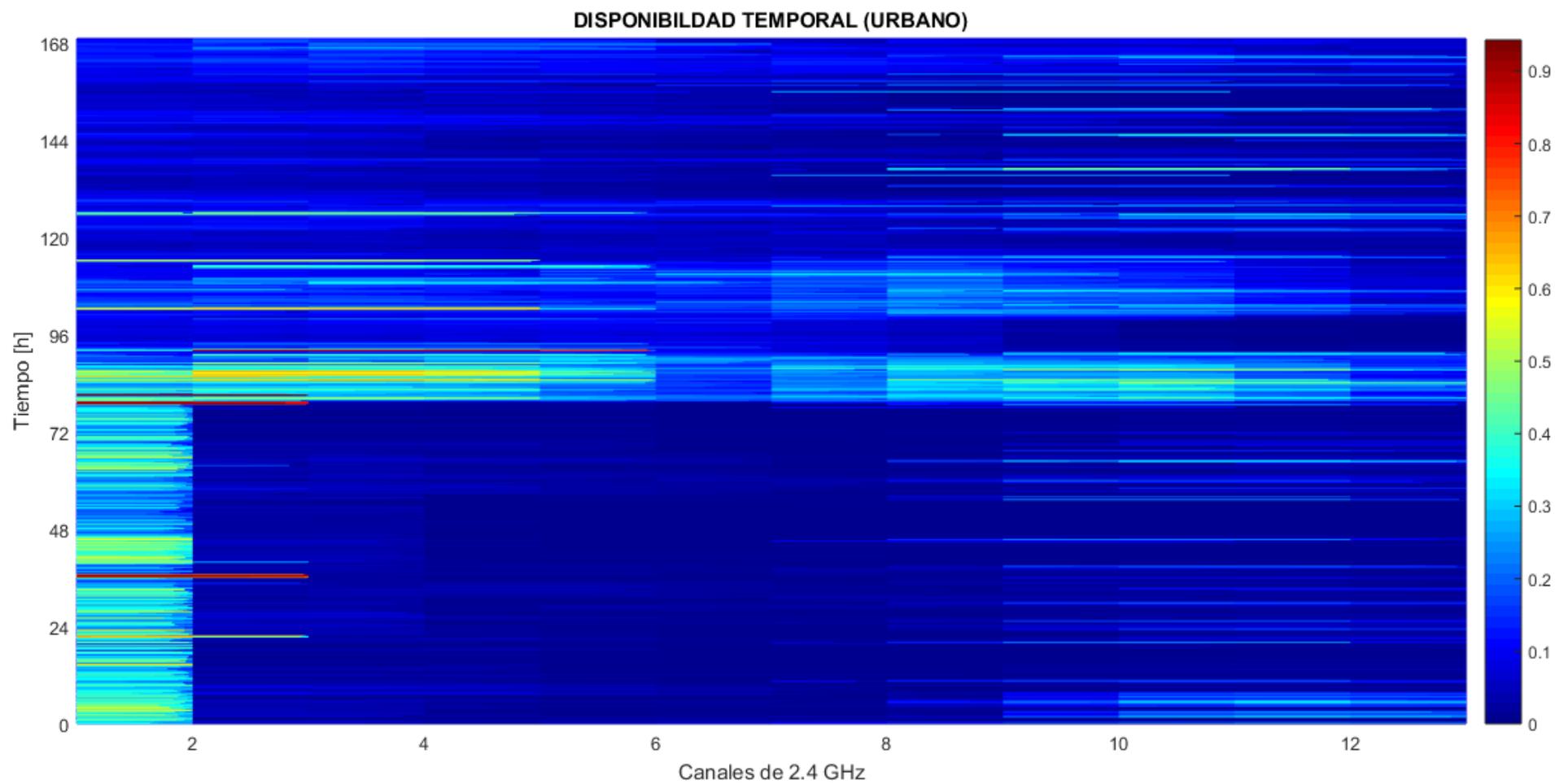


Figura 4.30: Disponibilidad en el escenario Urbano

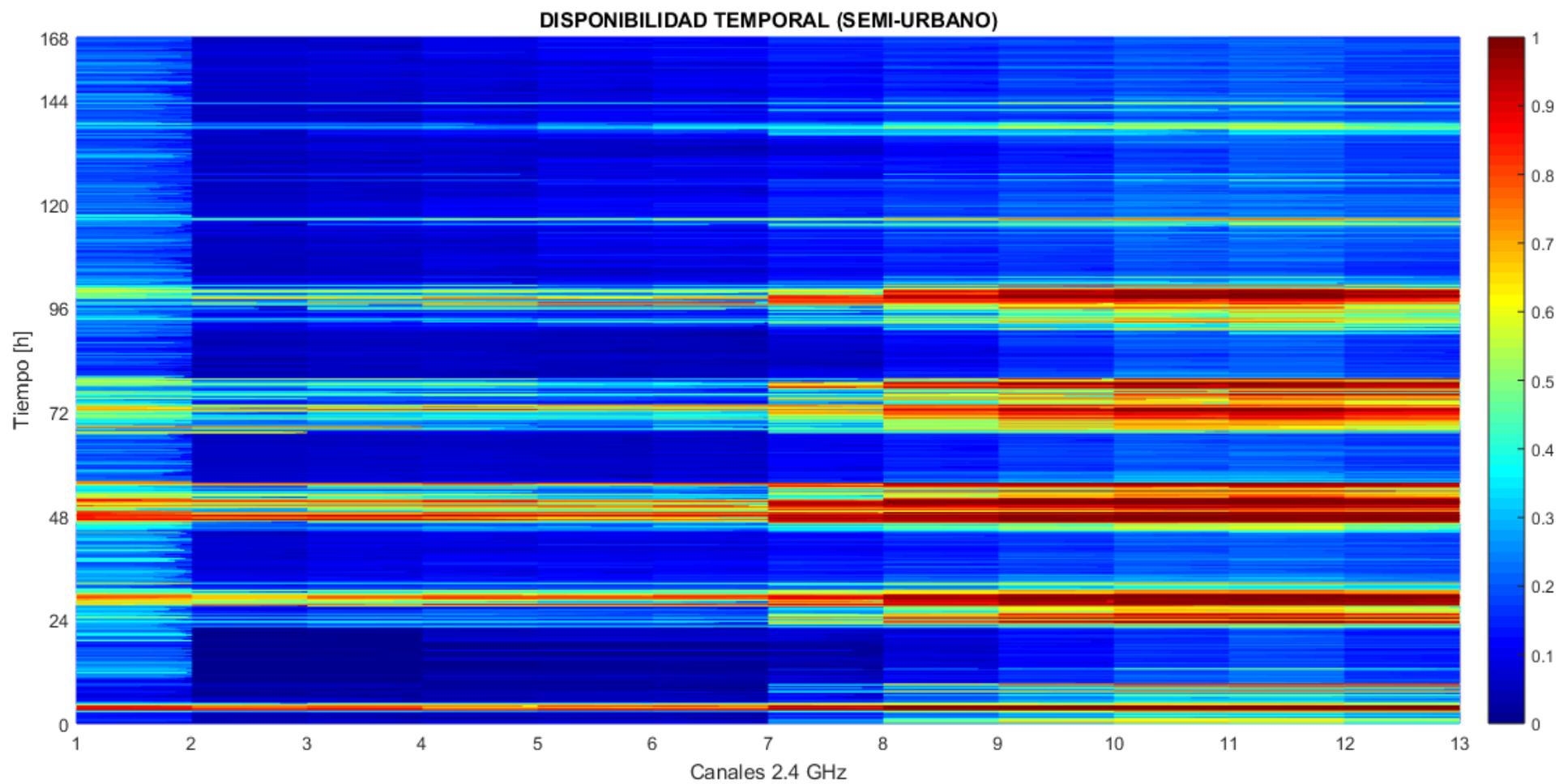


Figura 4.31: Disponibilidad en el escenario Semi-Urbano

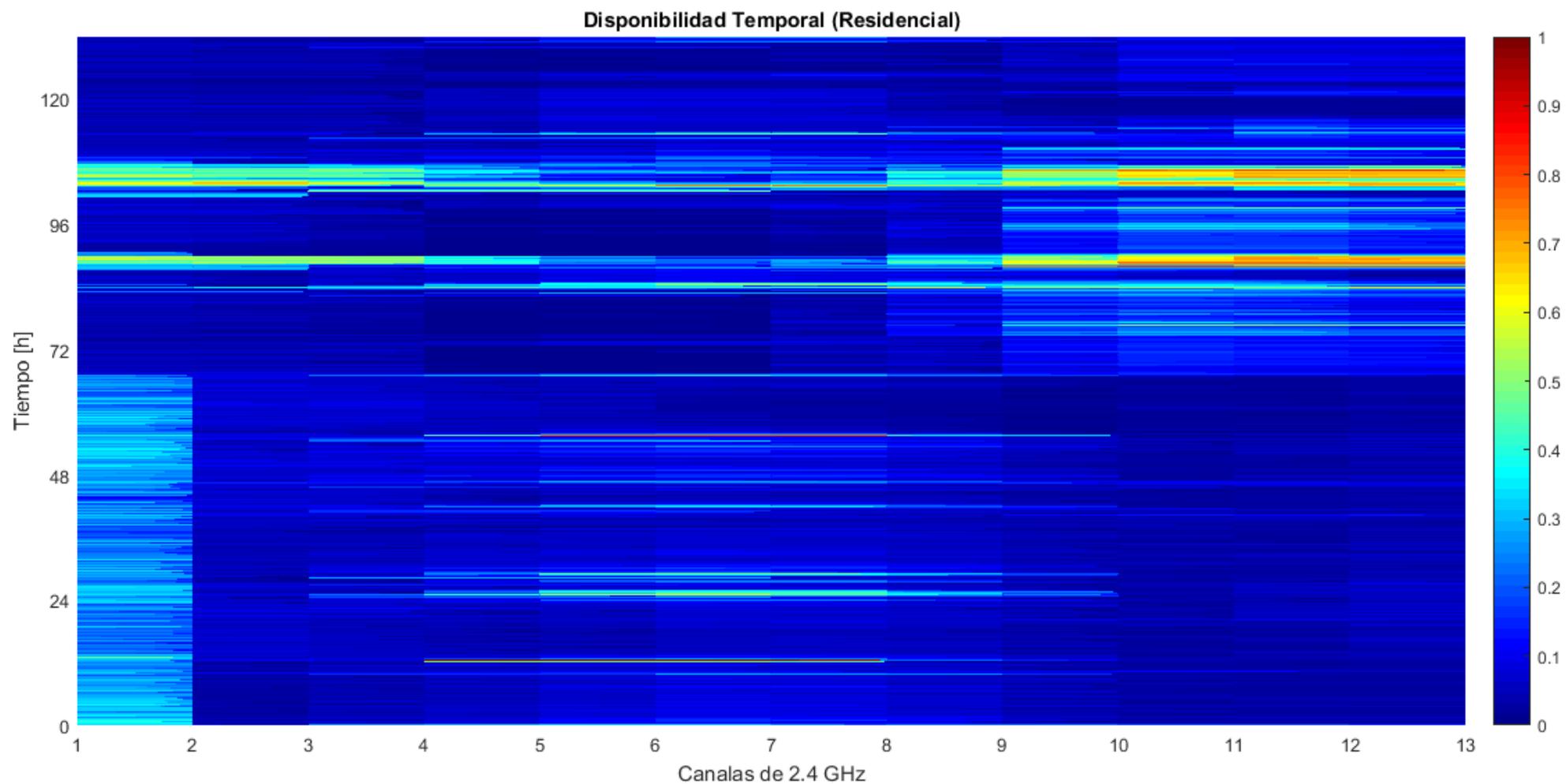


Figura 4.32: Disponibilidad en el escenario Residencial

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente proyecto permitió realizar un análisis minucioso de la banda de 2.4GHz en ambientes externos ya que a la presente fecha existen muchos proyectos que se orientan más a un análisis general, realizando un barrido de un gran rango de frecuencias, con antenas desplegadas sobre terrazas donde no se puede realizar un correcto análisis de esta banda.

Respecto a los datos medidos en el escenario urbano se puede concluir que existe una gran cantidad de equipos desplegados dentro de los canales del 1 al 6. Lo cual nos indica que dentro de estos canales existen mayores niveles de interferencia debido a la concentración de dispositivos. Sin embargo, el canal de mayor ocupación es el uno. Por lo tanto, es recomendable usar los canales superiores de la banda de 2.4GHz.

Respecto a los datos medidos para el escenario semi-urbano se puede concluir que es óptimo ocupar los canales inferiores, ya que, mediante lo analizado en las estadísticas de la CDF, en el espectrograma de potencia, disponibilidad y las señales en el tiempo se observa que estos canales presentan bajos niveles de ocupación lo cual me indica que los niveles de interferencia son menores en relación a los demás canales; mientras que el canal 11 y sus adyacentes se encuentran altamente activos.

Respecto a los datos medidos para el escenario residencial se puede concluir que los niveles de potencia son menores en comparación con los otros dos escenarios analizados. De acuerdo a los niveles de potencia obtenidos se observa que los canales de mayor concentración de equipos son los del centro y el canal uno.

De acuerdo a la información obtenida se puede concluir que el canal de mayor ocupación en todos los escenarios es el canal uno.

Se puede concluir que los niveles de potencia de la banda 2.4GHz son mucho más variantes en el tiempo, en comparación a los niveles de otras bandas como en las que opera las señales de televisión, que presentan más estabilidad. Por lo cual la disponibilidad de los canales en los tres diferentes escenarios varía dependiendo de parámetros relacionados con el tiempo, tales como horas y días de la semana.

Colocar los equipos de medición bajo condiciones seguras, donde sea posible que estos puedan trabajar de forma óptima y continua para garantizar la confiabilidad de la captura de datos.

Para la toma de datos, es recomendable usar una maquina como servidor que solo corra el programa utilizado para esta tarea.

Para el procesamiento de datos es recomendable usar un programa muy robusto y de gran utilidad como Matlab.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Diario El Universo, «Ecuador, Guayaquil Digital: Proyecto para convertirla en la primer ciudad inteligente de» (2014, Junio 16). [Online]. Disponible en: <http://www.eluniverso.com/noticias/2014/06/16/nota/3112551/guayaquil-digital-proyecto-convertirla-primer-ciudad-inteligente>. [Último acceso: 2016 Mayo 10].
- [2] Diario Expreso, «Guayaquil, en vía de ser ciudad inteligente» (2015, Mayo 4). [Online]. Disponible en: http://expreso.ec/historico/guayaquil-en-via-de-ser-ciudad-inteligente-NWGR_7597616. [Último acceso: 2016 Mayo 14].
- [3] G. Seisdedos, «IoT Telefonica» (2015). [Online]. Disponible en: <https://iot.telefonica.com/libroblanco-smart-cities/media/libro-blanco-smart-cities-esp-2015.pdf>. [Último acceso: 2016 Junio 15].
- [4] K. Sohraby, D. Minoli y T. Znati, «Available Wireless Technologies,» de *Wireless Sensor Networks- Technology, Protocols and Applications*, Wiley Interscience, 2007, 2007, pp. 103-105.
- [5] A. Palaios, J. Riihijarvi, P. Mahonen, «From Paris to London: Comparative Analysis of Licensed Spectrum Use in Two European Metropolises», De Institute for Networked Systems, 2014.
- [6] Salim A. Hanna y John Sydor, «Distributed Sensing of Spectrum Occupancy and Interference in Outdoor 2.4 GHz Wi-Fi Networks,» de *Goblecom 2012 -Cognitive Radio and Networks Symposium*, 2012.
- [7] K. Sohraby, D. Minoli y T. Znati, «Propagation and Propagation Impairments,» de *Wireless Sensor Networks- Technology, Protocols and Applications*, Wiley Interscience, 2007, pp. 94-97.

- [8] Miguel Lopez-Benitez y Fernando Casadevall, «Signal Uncertainty in Spectrum Sensing for cognitive Radio». De IEEE Transactions on Communications on 2013 Febrero 20, pp. 1231 – 1241.
- [9] ITU-T, «Y.2060 SERIES Y: GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTUR, INTERNET PROTOCOL ASPECTS AND NEXT-GENERATION NETWORKS,» 2012. [Online]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y/en>. [Último acceso: 2016 Junio 15].
- [10] [Enerlis, Ernst and Young, Ferrovial and Madrid Network, «Innopro Advanced,» Septiembre 2012. [Online]. Disponible en:
http://www.innopro.es/pdfs/libro_blanco_smart_cities.pdf.
[Último acceso: 10 Junio 2016].
- [11] N. Centre, «Smart Cities Mission» [Online]. Disponible en:
<http://smartcities.gov.in/writereaddata/What%20is%20Smart%20City.pdf>.
[Último acceso: 11 06 2016].
- [12] S. Yinbiao, K. Lee y P. Lanctot, «International Electrotechnical Commission,» 2014. [Online]. Disponible en:
<http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-internetofthings-LR-en.pdf>.
[Último acceso: 11 Junio 2016].
- [13] J. A. Stankovic, «Universidad de Virginia,» 19 Junio 2006. [Online]. Disponible en: <https://www.cs.virginia.edu/~stankovic/psfiles/wsn.pdf>. [Último acceso: 11 Junio 2016].
- [14] F. C. Comission, «Government Printing Office,» FCC, 2009. [Online]. Disponible en:
<https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2009-title47-vol1/pdf/CFR-2009-title47-vol1-part15.pdf>. [Último acceso: 13 06 2016].
- [15] ETSI, «ETS EN 301 893 », Julio 2014. [Online]. Disponible en:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301800_301899/301893/01.07.02_20/en_301893v010702a.pdf. [Último acceso: 12 06 2016].
- [16] ETSI, «ETSI EN 300 328,» Abril 2012. [Online]. Disponible en:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300300_300399/300328/01.08.01_30/en_300328v010801v.pdf. [Último acceso: 10 06 2016].

- [17] Designing and Deploying 802.11 Wireless Networks: A Practical Guide to Implementing 802.11n and 802.11ac Wireless Networks, Second Edition.
- [18] E. Hossain, D. Nivato y Z. Han, «Bluetooth,» de *Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks*, Cambridge university Press, 2009, p. 19.
- [19] M. H. Islam, «Spectrum Survey in Singapore: Occupancy Measurements and Analyses». De Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008. CrownCom 2008. 3rd International Conference on 15-17 May 2008.
- [20] A. U. a. F. C. Miguel Lopez Benitez, «Evaluation of Spectrum Occupancy in Spain for Cognitive Radio Applications». De Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th.
- [21] J. L. Joonas Kokkonieniemi, «Spectrum occupancy Measurements and Analysis Methods on the 2.4 GHz ISM Band». De Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), 2012 7th International ICST Conference on January 2012 .
- [22] Luis Fernando Pedraza, A. Molina «Spectrum Occupancy Statistics in Bogota - Colombia».De Communications and Computing (COLCOM), 2013 IEEE Colombian Conference on 22-24 May 2013.

ANEXOS

Anexo 1 Código en Labview para realizar la captura de datos

Rx-LV14.vi

Rx-LV14.vi es un programa el cual permite realizar una captura de 17 canales con un ancho de banda 5 MHz.

Panel Frontal Rx-LV14.vi

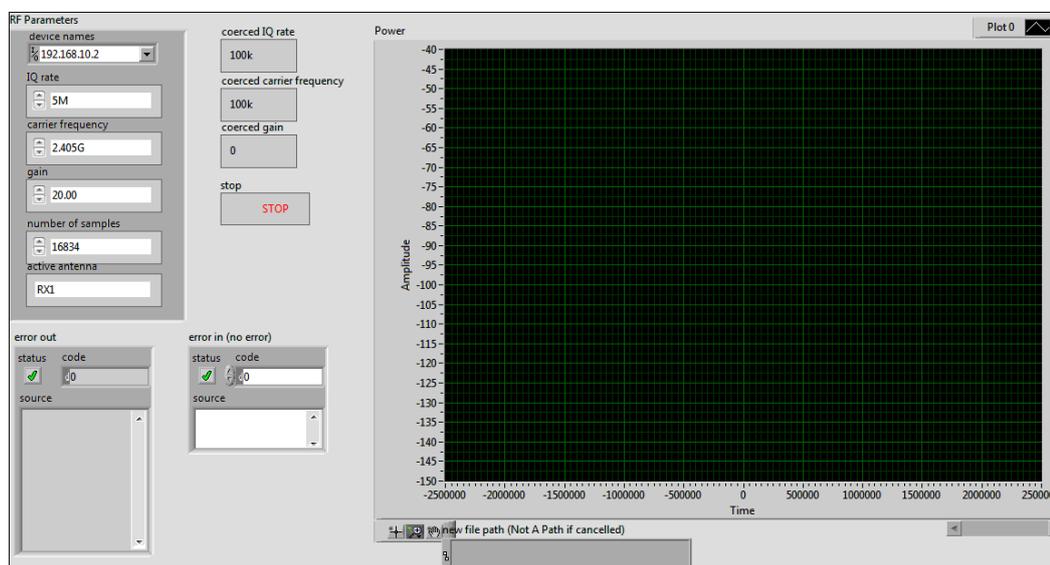
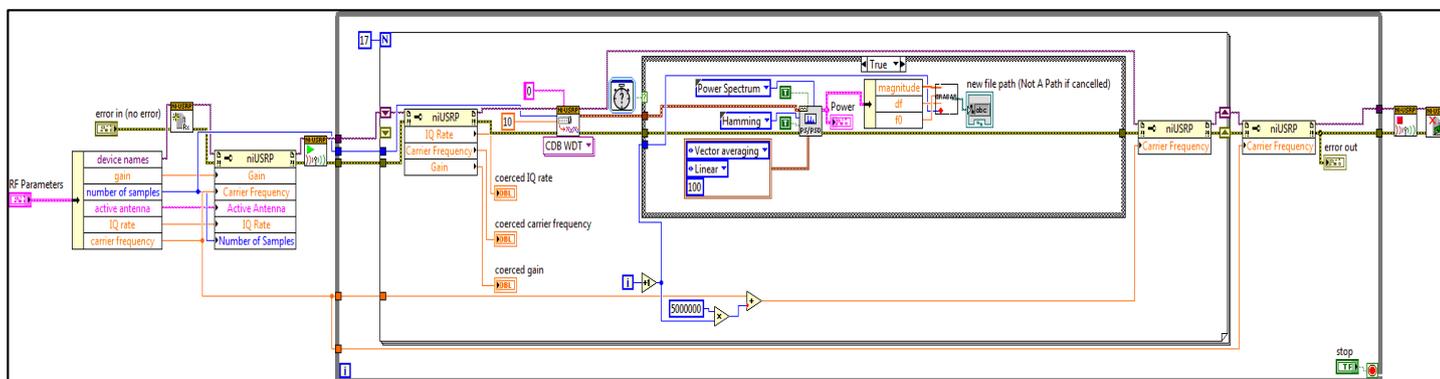


Diagrama de Bloques Rx-LV14.vi



Anexo 2 Código para procesamiento de datos obtenidos.

Agrupación de Datos capturados

Los datos capturados mediante el USRP y el código mostrado en el ANEXO 1 da como resultado 17 archivos de Excel, que tienen almacenados los niveles de cada canal.

Para el procesamiento de los datos es necesario crear un nuevo archivo de Excel, con el fin de obtener una matriz donde se visualicen los 17 Canales.

Para exportar el archivo de la Matriz de Excel a Matlab se utilizó la siguiente función PotRx_r.m, donde se utiliza el método xlsread para exportar 17_Canales.csv que representa el archivo creado

PotRx_r.m

```
function [Prx]= PotRx_r()
Prx=xlsread('17_Canales.csv');
```

Código para Obtener los niveles de potencia de 13 canales, a partir de los 17 Canales de 5 MHz capturados.

Se tiene trece funciones para cada uno de los canales. Dentro de cada función se seleccionan cuatro columnas de la matriz de diecisiete columnas que representa los diecisiete canales de 5 MHz capturados mediante el USRP. La función recorre cada fila y toma el valor de las cuatro columnas, compara cual es el mayor entre los cuatro y guarda el mayor valor en una nueva matriz. Dando como resultado los niveles de Potencia de un canal específico.

Canal1_data.m

```
function [CH1]= Canal1_data(Pt)
[m, n]=size(Pt);
CH1=zeros(m,1);
for k=1:m
    mayor=Pt(k,1);
    for i=2:4
        if(mayor <= Pt(k,i))
            mayor=Pt(k,i);
        end
    end
end
```

```
    end  
    CH1(k,1)=mayor;
```

```
end
```

Canal2_data.m

```
function [CH2]= Canal2_data(Pt)  
[m, n]=size(Pt);  
CH2=zeros(m,1);  
for k=1:m  
    mayor=Pt(k,2);  
    for i=3:5  
        if(mayor <= Pt(k,i))  
            mayor=Pt(k,i);  
        end  
    end  
    CH2(k,1)=mayor;  
end
```

Canal3_data.m

```
function [CH3]= Canal3_data(Pt)  
[m, n]=size(Pt);  
CH3=zeros(m,1);  
for k=1:m  
    mayor=Pt(k,3);  
    for i=4:6  
        if(mayor <= Pt(k,i))  
            mayor=Pt(k,i);  
        end  
    end  
    CH3(k,1)=mayor;  
end
```

Canal4_data.m

```
function [CH4]= Canal4_data(Pt)  
[m, n]=size(Pt);  
CH4=zeros(m,1);  
for k=1:m  
    mayor=Pt(k,4);  
    for i=5:7  
        if(mayor <= Pt(k,i))  
            mayor=Pt(k,i);  
        end  
    end  
    CH4(k,1)=mayor;  
end
```

Canal5_data.m

```
function [CH5]= Canal5_data(Pt)
[m, n]=size(Pt);
CH5=zeros(m,1);
for k=1:m
    mayor=Pt(k,5);
    for i=6:8
        if(mayor <= Pt(k,i))
            mayor=Pt(k,i);
        end
    end
    CH5(k,1)=mayor;
end
```

Canal6_data.m

```
function [CH6]= Canal6_data(Pt)
[m, n]=size(Pt);
CH6=zeros(m,1);
for k=1:m
    mayor=Pt(k,6);
    for i=7:9
        if(mayor <= Pt(k,i))
            mayor=Pt(k,i);
        end
    end
    CH6(k,1)=mayor;
end
```

Canal7_data.m

```
function [CH7]= Canal7_data(Pt)
[m, n]=size(Pt);
CH7=zeros(m,1);
for k=1:m
    mayor=Pt(k,7);
    for i=8:10
        if(mayor <= Pt(k,i))
            mayor=Pt(k,i);
        end
    end
    CH7(k,1)=mayor;
end
```

Canal8_data.m

```
function [CH8]= Canal8_data(Pt)
[m, n]=size(Pt);
CH8=zeros(m,1);
for k=1:m
    mayor=Pt(k,8);
    for i=9:11
        if(mayor <= Pt(k,i))
            mayor=Pt(k,i);
        end
    end
    CH8(k,1)=mayor;
end
```

Canal9_data.m

```
function [CH9]= Canal9_data(Pt)
[m, n]=size(Pt);
CH9=zeros(m,1);
for k=1:m
    mayor=Pt(k,9);
    for i=10:12
        if(mayor <= Pt(k,i))
            mayor=Pt(k,i);
        end
    end
    CH9(k,1)=mayor;
end
```

Canal10_data.m

```
function [CH10]= Canal10_data(Pt)
[m, n]=size(Pt);
CH10=zeros(m,1);
for k=1:m
    mayor=Pt(k,10);
    for i=11:13
        if(mayor <= Pt(k,i))
            mayor=Pt(k,i);
        end
    end
    CH10(k,1)=mayor;
end
```

Canal11_data.m

```

function [CH11]= Canal11_data(Pt)
[m, n]=size(Pt);
CH11=zeros(m,1);
for k=1:m
    mayor=Pt(k,11);
    for i=12:14
        if(mayor <= Pt(k,i))
            mayor=Pt(k,i);
        end
    end
    CH11(k,1)=mayor;
end

```

Canal12_data.m

```

function [CH12]= Canal12_data(Pt)
[m, n]=size(Pt);
CH12=zeros(m,1);
for k=1:m
    mayor=Pt(k,12);
    for i=13:15
        if(mayor <= Pt(k,i))
            mayor=Pt(k,i);
        end
    end
    CH12(k,1)=mayor;
end

```

Canal11_data.m

```

function [CH13]= Canal13_data(Pt)
[m, n]=size(Pt);
CH13=zeros(m,1);
for k=1:m
    mayor=Pt(k,13);
    for i=14:16
        if(mayor <= Pt(k,i))
            mayor=Pt(k,i);
        end
    end
    CH13(k,1)=mayor;
end

```

Función para crear Matriz de Estado

transforToBIN_matriz.m

```
function [CHu,Sum0,Sum1]= transforToBIN_matriz (PRx)
CHu=PRx;
Sum0=0;
Sum1=0;
[m,n]=size (PRx);
for j=1:n;
    for i = 1:m;
        if PRx (i, j)< -85
            CHu (i, j)=0;
            Sum0=Sum0+1;
        else
            CHu (i, j)=1;
            Sum1=Sum1+1;
        end
    end
end
```

La presente función tiene como parámetro de entrada una matriz, la cual es la matriz de niveles de potencia. Dentro de la función se define un nivel de umbral, el cual es de -85 dBm, con lo cual se reemplaza el nivel de potencia con el valor de cero si este es menor a -85 caso contrario se lo reemplaza con el valor de uno. Como resultado se tiene la matriz de Estado CHu, la sumatoria de ceros en la variable Sum0 y la sumatoria de unos en Sum1.

Función para cálculo de Disponibilidad

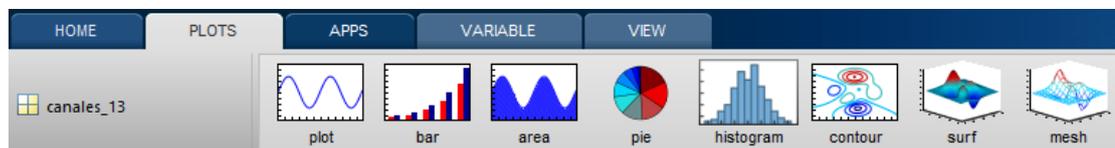
Promedio.m

```
function [Av_mean, Av_var]=promedio(State)
Av_mean=[];
Av_var=[];
for i=1:13
    x=State(:,i);
    y=mean(reshape(x(1:349965),105,3333))';
    z=var(reshape(x(1:349965),105,3333))';
    Av_mean=[Av_mean y];
    Av_var=[Av_var z];
End
```

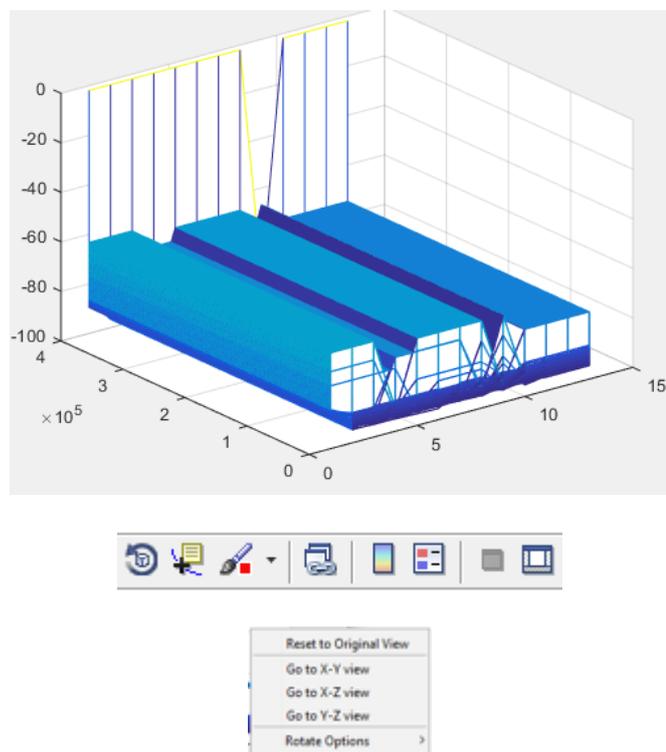
La función que se muestra realiza el cálculo que se describió en el capítulo 3 sección análisis de los datos, mediante los métodos `reshape` y `mean`.

Gráficos de Niveles de Potencia y Disponibilidad

Para realizar los Espectrogramas una vez obtenida la información mediante Matlab se selecciona la opción de PLOTS y luego MESH como se muestra.



Se obtiene un resultado como el que se muestra a continuación para lo cual se selecciona la opción ROTATE 3D y se da clic sobre la gráfica seleccionando la opción GO TO X-Y VIEW.



Una vez selección GO TO X-Y VIEW se mostrará una gráfica como la que se muestra a continuación donde se puede customizar de acuerdo a las necesidades.

