



**UNCUYO**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE CUYO

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO**  
**Facultad de Ingeniería**

**“CARACTERIZACIÓN, ESTIMACIÓN Y PREDICCIÓN DEL  
COMPORTAMIENTO TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA  
DISPONIBILIDAD DEL ESPECTRO RADIO ELÉCTRICO EN  
INTERIORES DE EDIFICIOS, PARA SU USO POTENCIAL EN  
DISPOSITIVOS DE CORTO ALCANCE BASADOS EN ACCESO  
DINÁMICO AL ESPECTRO Y RADIO COGNITIVA”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**  
**Previo a la obtención del Título de:**  
**DOCTORADO EN INGENIERÍA**

Autor:

**WASHINGTON ADOLFO MEDINA MOREIRA**

Dirigido por:

**PhD. FRANCISCO NOVILLO PARALES**

**MENDOZA – ARGENTINA**

2020

*Porque Dios no nos ha dado un espíritu de temor y timidez, sino de poder, amor y autodisciplina*

(2 Timoteo 1,7)



---

**WASHINGTON ADOLFO MEDINA MOREIRA**  
**ESTUDIANTE PROGRAMA DOCTORAL**



---

**PhD. FRANCISCO NOVILLO PARALES**  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

# RESUMEN

---

En las últimas décadas, debido al desarrollo de la tecnología inalámbrica, se han incrementado dramáticamente los servicios móviles, surgiendo así una imperiosa necesidad de los operadores de telecomunicaciones de nuevos segmentos espectrales. Si se considera que el crecimiento de este tipo de servicios sigue la Regla de Cooper, regla que establece que las comunicaciones inalámbricas en un área geográfica determinada crecen a un ritmo del 200% cada 2 años y medio; y, si además ese crecimiento es drásticamente acelerado por las necesidades modernas de comunicación inalámbrica, se crean las condiciones para que emerja un gran problema conocido como la escasez de espectro.

Básicamente, la escasez de espectro se presenta como una deficiencia en la oferta del recurso espectro electromagnético (EE), situación anómala que puede producirse tanto en los sistemas licenciados como en los sistemas de banda compartida. En el caso de los sistemas que operan en bandas compartidas (como la banda ISM), una desmesurada concentración de redes inalámbricas que se encuentren brindando servicios a una gran cantidad de usuarios, puede producir altos niveles de interferencia, generando inconvenientes técnicos que se reflejan en la degradación de los servicios, llegando incluso a negar el servicio a los usuarios; de la misma manera, en el caso de los sistemas que operan en bandas licenciadas (i.e. GSM, UMTS), una gran concentración de usuarios producirá la congestión del sistema. Estas situaciones se agravarán más si los eventos arriba mencionados ocurren en pequeñas áreas o en ambientes cerrados como sitios de espectáculos, de eventos deportivos, e incluso, en el interior de edificios.

Sin embargo, este problema podría complicarse aún más, pues nuevos servicios y sistemas inalámbricos (e.g. IoT, WSN, M2M, V2V) se están proponiendo para el corto plazo para las ciudades y los edificios inteligentes, pues ellos deben proporcionar a sus clientes muchos servicios, incluidos los relacionados con la salud, la productividad y la eficiencia energética, entre otros. Los sistemas inalámbricos de corto alcance pueden proporcionar todos estos servicios, pero el crecimiento significativo de las redes inalámbricas que operan dentro de un edificio con inteligencia puede recrudecer el fenómeno de la escasez de espectro.

Desde el punto de vista de la gestión del espectro, se considera que el problema arriba descrito está sostenido por los métodos rígidos de administración del espectro, porque han permitido el uso poco eficiente del espectro en aras de pretender controlar la interferencia hacia las bandas licenciadas; y porque, en las bandas no licenciadas se ha hecho exactamente todo lo contrario, no se controlan ni registran los despliegues de sistemas. La gestión dinámica del espectro es planteada como una posible solución a estos problemas, debido a que el Acceso Dinámico al Espectro (DSA) es un modelo de administración que mejora la eficiencia en el uso del espectro, permitiendo que operadores no licenciados puedan hacer uso de segmentos de un espectro licenciado

siempre y cuando estén disponibles, y que su uso no le produzca interferencia al sistema licenciado. Sin embargo, es con la tecnología Radio Cognitiva (CR) que se puede implementar DSA, por lo que esta combinación se muestra como una solución ante la posible saturación del espectro en las ciudades inteligentes, y muy especialmente, al interior de los edificios inteligentes ubicados en zonas urbanas densas, porque ayudan a mejorar la eficiencia del uso del espectro electromagnético. Para operar, estos sistemas deben determinar la disponibilidad del espectro en tiempo real en el interior del edificio, por lo que necesitarían sensarlo continuamente, sin embargo, otra opción es conocer con anticipación la disponibilidad del espectro, lo cual resuelve dos problemas asociados al sensado continuo, el gasto adicional de energía y la posibilidad de no reaccionar adecuadamente ante una alta variabilidad de la disponibilidad.

En este contexto, este trabajo doctoral se enfoca en tratar de contrarrestar el problema de la escasez de espectro en el interior de edificios ubicados en zonas urbanas densas, proponiendo el uso de sistemas cognitivos de corto alcance basados en DSA para mejorar la eficiencia en el uso del espectro en el interior de los edificios.

Para ello, se caracteriza y modela la disponibilidad del espectro de TV en interiores de edificios ubicados en zonas urbanas densas, en base a campañas de medición de niveles de potencia; así también, se analiza si pueden operar, al interior de edificios, los sistemas inalámbricos de corto alcance basados en DSA y Radio Cognitiva (CR).

Como una novedad, se desarrolla un mecanismo que permite estimar, sin mediciones, la mínima cantidad de disponibilidad espectral efectiva (ESA) en toda el área interior de un edificio inteligente; con ello, se establecen los sitios al interior del edificio donde pueda operar un sistema de corto alcance con capacidades cognitivas. El mecanismo toma en cuenta que, para estimar la ESA, se debe cumplir con los dos postulados de DSA, confirmar la ausencia del operador incumbente o licenciado, y también evitar la posible interferencia que se produciría sobre un despliegue interno de usuarios del sistema incumbente. Adicionalmente, se validaron los modelos de propagación utilizados en este estudio, comparando valores de potencia encontrados con simulaciones usando Matlab con valores mediciones de nivel de potencia tomadas en el interior de un edificio.

Otro mecanismo novedoso se desarrolló con el objetivo de predecir los comportamientos del espectro y su disponibilidad en el interior de un edificio, a partir de un histórico de mediciones de niveles de potencia; para ello se utilizó el modelo Long-Short Term Memory (LSTM) de Deep Learning junto a una modulación/demodulación angular, y mediciones de niveles de potencia en el interior del edificio. La modulación angular es usada porque varios trabajos previos de predicción han reportado que sus modelos predictivos son muy sensibles a la variabilidad de la data de entrada.

---

# ABSTRACT

---

In recent decades, due to the development of wireless technology, mobile services have increased dramatically, thus creating an urgent need for new spectral segments by telecommunications operators. Considering that the growth of this type of services follows Cooper's Rule, a rule that establishes that wireless communications in a given geographic area grow at a rate of 200% every 2 and a half years; and if that growth is also drastically accelerated by modern wireless communication needs, the conditions are created for a major problem known as spectrum scarcity to emerge.

Basically, the spectrum shortage appears as a deficiency in the supply of the electromagnetic spectrum resource, an anomalous situation that can occur both in licensed systems and in shared band systems. For systems that operate in shared bands (e.g. the ISM band), an excessive concentration of wireless networks that are providing services to a large number of users, can produce high levels of interference, generating technical inconveniences that are reflected in the degradation of services, even denying the service to users. In the same way, systems that operate in licensed bands (i.e. GSM, UMTS), a large concentration of users will cause system congestion. These situations will be further aggravated if the events mentioned above occur in small areas or in closed environments such as venues for shows, sporting events, and even inside buildings.

However, this problem could become even more complicated, as new wireless services and systems (e.g. IoT, WSN, M2M, V2V) are being proposed for the short term for smart cities and buildings; as they must provide their customers with many services including those related to health, productivity and energy efficiency, among others. Short-range wireless systems can provide all of these services, but the significant growth of wireless networks operating within a smart building can exacerbate the phenomenon of spectrum scarcity.

From the point of view of spectrum management, it is considered that the problem described above is supported by the rigid methods of spectrum administration, because they have allowed the inefficient use of the spectrum in order to try to control the interference towards the licensed bands; and in unlicensed bands, the exact opposite has been done, system deployments are not controlled or recorded. Dynamic spectrum management is proposed as a possible solution to these problems, because Dynamic Spectrum Access (DSA) is an access model that improves spectrum use efficiency. This allows unlicensed operators, known as Secondary Systems (SS), to make use of spectrum segments of an incumbent operator, as long as they are available, so their use does not cause interference to

the licensed system, known as Primary System (PS).

However, it is with Cognitive Radio (CR) technology that DSA can be implemented, so this combination is shown as a solution to the possible saturation of the spectrum in smart cities, and very especially, inside smart buildings located in dense urban areas, because they help to improve the efficiency of the use of the electromagnetic spectrum. To operate, these systems must determine the availability of the spectrum in real time inside the building, while continuously sensing it. However, another option is to know in advance the availability of the spectrum, which solves two problems associated with continuous sensing, both the additional expenditure of energy and the possibility of not reacting adequately to a high variability of availability.

In this context, this doctoral work focuses on trying to counteract the problem of spectrum scarcity inside buildings located in dense urban areas, proposing the use of short-range cognitive systems based on DSA to improve efficiency in spectrum use inside buildings.

To achieve this in this work, the availability of the TV spectrum is characterized and modeled indoors in buildings located in dense urban areas, based on power level measurement campaigns. Likewise, it is analyzed whether short-range wireless systems based on DSA and Cognitive Radio (CR) can operate inside buildings.

As a novelty, a mechanism that allows estimating, without power measurements, the minimum amount of effective spectral availability (ESA) in the entire interior area of a smart building is developed. With this, the places inside the building where a short-range system with cognitive capabilities can operate are established. To estimate the ESA this mechanism takes into account the two postulates of DSA, first, establishing the absence of the incumbent or licensed operator, and secondly, also avoiding the possible interference that would occur on an internal deployment of users of the incumbent system. Additionally, the propagation models used in this study were validated, comparing power values found with simulations using Matlab software with measured power level values inside a building.

Another novel mechanism was developed in order to predict spectrum behavior and its availability inside a building, based on a history of power level measurements; For this, the Deep Learning Long-Short Term Memory (LSTM) model was used together with an angular modulation / demodulation process, and measurements of power levels inside the building. Angular modulation is used because several previous prediction works have reported that its predictive models are very sensitive to the variability of the input data.

---

# DEDICATORIA

---

Esta tesis está dedicada a:

-Toda mi familia, en especial a Ema, mi esposa, a mis hijos y mis nietos, por su apoyo y su ayuda incondicional durante el desarrollo de este trabajo.

-Mis amigos y mis compañeros, que de una u otra manera, me han incentivado para terminar este trabajo.



---

# AGRADECIMIENTO

---

Presento un agradecimiento muy especial al PhD. Francisco Novillo, quien con sus consejos, dirección y sapiencia supo guiarme por este difícil camino del trabajo doctoral.

---

# ÍNDICE

---

RESUMEN.....	iv
DEDICATORIA.....	vii
AGRADECIMIENTO .....	viii
ÍNDICE.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABLAS .....	xv
LISTA DE ABREVIACIONES .....	xvi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ENFOQUE, ALCANCE Y MOTIVACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS .....	6
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	7
1.4. RESULTADOS OBTENIDOS.....	9
2. ESTADO DEL ARTE .....	11
2.1. ESTADO DEL ARTE EN DSA Y CR .....	11
2.2. ESTADO DEL ARTE EN TVWS.....	12
2.3. ESTADO DEL ARTE EN PREDICCIÓN DEL ESPECTRO .....	14
3. MODELADO DE LA DISPONIBILIDAD DEL ESPECTRO EN EL INTERIOR DE EDIFICIOS ...	17
3.1. INTRODUCCIÓN .....	17
3.2. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO .....	19
3.3. SISTEMA DE MEDICIÓN.....	21

3.4.	MODELADO DEL PROCESO DE DETERMINACIÓN DE DISPONIBILIDAD.....	22
3.4.1.	DISPONIBILIDAD ESPACIAL DENTRO DEL EDIFICIO.....	24
3.4.2.	DISPONIBILIDAD TEMPORAL DENTRO DEL EDIFICIO.....	27
3.5.	MODELADO DE LA DISPONIBILIDAD DE CANALES.....	29
3.5.1.	MODELADO DE LA DISPONIBILIDAD DE UN CANAL .....	29
3.5.2.	DISPONIBILIDAD DE CANALES CONTIGUOS .....	33
3.5.3.	CAPACIDAD DE LOS CANALES DISPONIBLES .....	34
3.6.	MEDICIONES Y RESULTADOS .....	35
3.6.1.	CASO 1: BAJA DISPONIBILIDAD TEMPORAL.....	35
3.6.2.	CASO 2: ALTA DISPONIBILIDAD TEMPORAL .....	46
3.6.3.	DISPONIBILIDAD DE CANALES CONTIGUOS .....	55
3.7.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	57
4.	MECANISMO DE ESTIMACIÓN ESPACIAL DE ESA EN INTERIORES DE EDIFICIOS.....	59
4.1.	INTRODUCCIÓN .....	59
4.2.	ESCENARIOS Y MODELOS DEL SISTEMA .....	62
4.2.1.	DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO.....	62
4.2.2.	MODELADO DE LAS CONDICIONES DE INTERFERENCIA .....	64
4.2.3.	MODELADO DE C1.....	67
4.2.4.	MODELADO DE C2.....	69
4.2.5.	MODELADO DE LA ESA.....	70
4.3.	VALIDACIÓN DE LAS CONDICIONES DE INTERFERENCIA.....	71
4.3.1.	ESCENARIO DE LAS CAMPAÑAS DE MEDICIÓN .....	72

4.3.2.	VALIDACIÓN DE LA CONDICIÓN DE INTERFERENCIA C1.....	74
4.3.3.	INFLUENCIA DEL SHADOWING Y RUIDO TÉRMICO.....	78
4.3.4.	VALIDACIÓN DE LA CONDICIÓN DE INTERFERENCIA C2.....	81
4.4.	RENDIMIENTO DEL MECANISMO DE ESTIMACIÓN DE ESA.....	82
4.5.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	88
5.	MECANISMO BASADO EN DEEP LEARNING PARA PREDICCIÓN DE ESA.....	91
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	91
5.2.	MODELO DEL MECANISMO DE PREDICCIÓN DEEP LEARNIG.....	92
5.2.1.	ESCENARIO DE LA PREDICCIÓN.....	93
5.2.2.	PROCESO DE MODULACIÓN PARA PREDICCIÓN DEL ESPECTRO.....	94
5.2.3.	PROCESO DE ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DEL ESPECTRO.....	99
5.3.	RESULTADOS.....	102
5.3.1.	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA PREDICCIÓN.....	102
5.3.2.	PREDICCIÓN DEL ESPECTRO CON MODELO LSTM.....	105
5.3.3.	ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DEL ESPECTRO.....	106
5.4.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	109
	CONCLUSIONES.....	111
	TRABAJOS FUTUROS.....	113
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
	ANEXO 1: Código del mecanismo de estimación de ESA (Matlab).....	129
	ANEXO 2: Códigos del mecanismo de predicción de ESA (Python).....	133

---

# LISTA DE FIGURAS

---

Fig. 1.1 Estructura de la Tesis .....	8
Fig. 3.1 Zonas urbanas densas de la ciudad de Nanjing, China .....	19
Fig. 3.2 Edificio con despliegue de sistemas de corto alcance cognitivos y despliegue de usuarios del sistema incumbente. ....	21
Fig. 3.3 Sistema de medición para la obtención de los niveles de potencia .....	21
Fig. 3.4 Distribución y ocupación de los canales en un BW. ....	23
Fig. 3.5 Determinación de disponibilidad espectral .....	23
Fig. 3.6 Escenario considerado para obtener una disponibilidad efectiva para los SS ...	26
Fig. 3.7 Ejemplo de realizaciones de las mediciones del espectro y su división en canales. ....	30
Fig. 3.8 a) Ubicación del edificio WTC y b) imagen del edificio del caso 1. ....	35
Fig. 3.9 Mapa de calor de las potencias recibidas en el piso 16. ....	37
Fig. 3.10 Mapa de calor de las potencias recibidas en el piso 9 .....	38
Fig. 3.11 Mapa de calor de las potencias recibidas en el piso 1. ....	39
Fig. 3.12 Mapa de calor de la disponibilidad de canales en el piso 16. ....	40
Fig. 3.13 Mapa de calor de la disponibilidad de canales en el piso 9. ....	42
Fig. 3.14 Mapa de calor de la disponibilidad de canales en el piso 1. ....	42
Fig. 3.15 Diagrama del CDF de los canales disponibles en los 3 pisos del estudio. ....	43
Fig. 3.16 Diagrama de los CDF de los canales 23,40 y 45 en el piso 16. ....	44
Fig. 3.17 Diagrama de los CDF de los canales 23,40 y 45 en el piso 9. ....	45
Fig. 3.18 Diagrama de los CDF de los canales 23,40 y 45 en el piso 1. ....	45
Fig. 3.19 a) Ubicación del edificio de la UPS con relación a Cerro Azul y Cerro El Carmen; b) Imagen frontal del edificio de la UPS. ....	46
Fig. 3.20 Diagrama de calor de la disponibilidad de canales de TV en la terraza del edificio. ....	47
Fig. 3.21 Diagrama de calor de la disponibilidad de canales de TV en el piso 1, con granularidad de 37 min. ....	48
Fig. 3.22 Diagrama de calor de la disponibilidad en el piso 1, durante la primera hora de mediciones, con granularidad de 1.56 min. ....	49

Fig. 3.23 Comparación de los CDFs de la disponibilidad de canales de TV del piso 1 con el en el piso 5. ....	49
Fig. 3.24 Porcentaje de disponibilidad de la banda de TV en el piso 1. ....	50
Fig. 3.25 Comparación de los CDF de los canales 24, 28, 34 y 38 con la función densidad Beta. ....	51
Fig. 3.26 Análisis de sensibilidad del PDF de la disponibilidad del espectro respecto a $P_{TH}$ . ....	52
Fig. 3.27 Análisis de sensibilidad del CDF de la disponibilidad del espectro respecto a $P_{TH}$ . ....	53
Fig. 3.28 CDF de la capacidad oportunistica disponible en el piso1, respecto a diferentes valores de $P_{TH}$ . ....	54
Fig. 3.29 CDF de la disponibilidad de canales conjuntos en el piso1, respecto a $P_{TH}$ . .	56
Fig. 3.30 CDF de la disponibilidad de grupos de canales conjuntos en el piso1, $P_{TH} = -75 \text{ dBm}$ . ....	56
Fig. 4.1 Escenario que considera un despliegue de SR-CRWS y de PU dentro de un SB ubicado en un escenario urbano denso de una SC. ....	63
Fig. 4.2 Definición de parámetros y condiciones de interferencia para determinación de la ESA ....	65
Fig. 4.3 Modelo de 5 rayos usado para calcular la potencia en interiores. Los rayos S1 y S5 son directos mientras que los rayos S2, S3 y S4 son reflejados desde los edificios vecinos. ....	68
Fig. 4.4 Sistema de Medición en el edificio pequeño. (a) Analizador de espectros Anritsu. (b) Generador RF, Agilent. (c) Sistema Transmisor. (d) Sistema Receptor .....	73
Fig. 4.5 (a) Ubicación y distancia de separación entre el edificio Torres de la Merced (punto A) y la BS del canal 25 UHF TV (punto B). (b) Vista parcial del edificio Torres de la Merced. ....	74
Fig. 4.6 Nivel de interferencia, simulado y medido, recibido en los departamentos ubicados en la cara frontal del edificio ....	75
Fig. 4.7 Nivel de interferencia, simulado y medido, recibido en los departamentos ubicados en el sector medio del edificio ....	76
Fig. 4.8 Comportamiento de los niveles de potencia medidos y simulados en el interior del edificio Torres de la Merced. ....	77

Fig. 4.9 Variación de los niveles de interferencia simulados con el modelo EGLI considerando IC=95% en los apartamentos del sector medio del edificio, comparada con las mediciones realizadas. ....	80
Fig. 4.10 Comportamiento de los niveles de interferencia simulados con MWM y las mediciones realizadas en la terraza del edificio, incluyendo el IC=95%. 81	81
Fig. 4.11 Comportamiento de la ESAF para edificios de 20 pisos y de 40 pisos. Nótese que en los dos últimos pisos de cada edificio no existe disponibilidad. ....	84
Fig. 4.12 Comportamiento de ESAF para un edificio de 100 pisos, $d= 1$ Km. ....	85
Fig. 4.13 Comportamiento del ESA para edificios de diferente altura, separados una distancia $d$ desde la BS. ....	86
Fig. 4.14 Ganancia de la ESA considerando un SB de 40 pisos ubicado a $d = 0.5$ Km como referencia. ....	86
Fig. 5.1 Escenario de estudio mostrando despliegue de sistemas de corto alcance dentro de un edificio .....	94
Fig. 5.2 Diagrama de Flujo de los procesos de entrenamiento, modulación/demodulación y predicción de los niveles de potencia. ....	95
Fig. 5.3 Arquitectura de una celda de memoria LSTM .....	96
Fig. 5.4 Diagrama de flujo del proceso de predicción de disponibilidad del espectro. ..	99
Fig. 5.5 Comportamiento del coeficiente de correlación Spearman en los datos de modulación y demodulación, en función de la frecuencia de portadora .....	102
Fig. 5.6 Comportamiento del coeficiente de correlación Spearman para los datos modulados y demodulados, en función del parámetro feature .....	104
Fig. 5.7 La señal modulada antes de la predicción se muestra en color rojo. La línea azul muestra la señal que contiene exclusivamente los cambios de fase .....	105
Fig. 5.8 La señal de datos de medición se muestra en color azul, mientras que los datos de predicción están en color rojo. ....	106
Fig. 5.9 Comportamiento de las métricas de precisión de la predicción del espectro $Accu$ , en azul, y del error relativo de la disponibilidad $D_{RE}$ , en color negro .....	107

---

# LISTA DE TABLAS

---

Tabla 3-1 Pérdidas del modelo MWM hasta la antena del sistema primario .....	28
Tabla 3-2. Parámetros usados en la campaña de medición, caso 1.....	36
Tabla 3-3. potencial acceso oportunista para Dispositivos Cognitivos .....	54
Tabla 4-1 Coeficientes de Correlación: modelos de propagación vs. mediciones .....	78
Tabla 4-2. Parámetros usados en la obtención de la ESA.....	83
Tabla 4-3 Mapeo de Ganancia de ESA.....	87
Tabla 5-1 Parámetros para predicción .....	104
Tabla 5-2 Resultados de la disponibilidad del espectro.....	108



---

# LISTA DE ABREVIACIONES

---

BPLC	Comunicación De Banda Ancha Por Línea Eléctrica (Broadband Power Line Communication, por sus siglas en inglés)
BS	Estación Base (Base Station, por sus siglas en inglés)
BW	Ancho de Banda (Bandwidth, por sus siglas en inglés)
CaC	Comando y Control (Command and Control, por sus siglas en inglés)
CBC	Canal Baliza Cognitiva (Cognitive Beacon Channel, por sus siglas en inglés)
CDF	Función Densidad de Probabilidad Acumulativa
CR	Radio Cognitiva (Cognitive Radio, por sus siglas en inglés)
DSA	Acceso Dinámico al Espectro (Dynamic Spectrum Access, por sus siglas en inglés)
DSM	Administración Dinámica Del Espectro (Dynamic Spectrum Management, por sus siglas en inglés)
ESA	Disponibilidad Efectiva del Espectro (Effective Spectrum Availability, por sus siglas en inglés)
ESAF	ESA Por Piso
GSM	Servicio Móvil Global (Global Service Mobile, por sus siglas en inglés)
IC	Intervalo de Confianza
IID	Independiente e Idénticamente Distribuido
ISM	Industrial Científico Médico (Industrial Scientist Medical, por sus siglas en inglés)
LOS	Línea De Vista (Line of Sight, por sus siglas en inglés)

LSTM	Long-Short Term Memory (por sus siglas en Inglés)
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Múltiples Entradas, Múltiples Salidas
MSE	Error Medio Cuadrático (Mean Square Error, por sus siglas en inglés)
NLOS	Sin Línea De Vista (Non Line of Sight, por sus siglas en inglés)
PDF	Function Distribución De Masa Probabilística
PS	Sistema Primario (Primary Sistem, por sus siglas en inglés)
RFID	Identificación Por Radio Frecuencia (Radio Frequency Identification, por sus siglas en inglés)
SB	Edificio Inteligente (Smart Building, por sus siglas en inglés)
SC	Ciudad Inteligente (Smart City, por sus siglas en inglés)
SDR	Radio Definida Por Software (Software Defined Radio, por sus siglas en inglés=
SR-CRWS	Sistema Inalámbrico Cognitivo De Corto Alcance
SS	Sistema Secundario
TVGS	Espacio Gris De Television (TV Gray Space, por sus siglas en inglés)
TVWS	Espacio En Blanco De Televisión (TV White Space, por sus siglas en inglés)
VHF	Frecuencia Muy Alta (Very High Frequency, por sus siglas en inglés)
WRAN	Red Inalámbrica De Acceso Regional (Wireless Regional Access Network, por sus siglas en inglés)
WS	Espacio En Blanco (White Space, por sus siglas en inglés)
WSN	Red De Sensores Inalámbricos (Wireless Sensor Network, por sus siglas en inglés)



---

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. ENFOQUE, ALCANCE Y MOTIVACIÓN

El crecimiento explosivo de las comunicaciones inalámbricas y las conexiones masivas en zonas urbanas densas, están convirtiendo al espectro electromagnético en un recurso muy escaso [1], situación que se agravaría debido a la migración desde las zonas rurales a las zonas urbanas, pues predicciones actuales indican que para el año 2030, el 60,4% de la población mundial sería urbana, concentrada en grandes ciudades de países desarrollados [2].

Estas ciudades deben ser planificadas adecuadamente para que brinden sus servicios de manera inteligente, en base a una estructura tecnológica [3]; por lo que, las ciudades, y por ende sus edificios, desplegarían grandes cantidades de sistemas inalámbricos de corto alcance para proporcionar sus servicios públicos o privados a sus usuarios móviles [4], lo cual agravaría la escasez de espectro. En la actualidad, los edificios muy grandes son diseñados y construidos integrados totalmente a su entorno, de forma tal que muestren un alto nivel de inteligencia, con el fin de mejorar los servicios brindados a sus usuarios (p.e.: salud, administración de energía, confort visual, confort térmico y productividad) [5]. Para que se cumpla esta mejora en los servicios, los usuarios deben estar siempre conectados, por lo que se preferirán las tecnologías de comunicación inalámbricas respecto de las redes cableadas; y muy especialmente, los sistemas interiores de corto alcance, ya que son de despliegue muy sencillo, presentan flexibilidad, brindan portabilidad, y son escalables [5].

Con este galopante escenario, también se incrementarán los usuarios de los servicios y, en consecuencia, el tráfico de datos global [6], provocando una mayor demanda de nuevos recursos radio; pero, este entusiasmo por segmentos de espectro adicionales no podrá satisfacerse simplemente asignando nuevo espectro, sino que debería ampliarse la capacidad utilizable del espectro con tecnologías innovadoras [7], porque las redes

inalámbricas de próxima generación podrían enfrentar también la escasez de espectro debido a la cantidad masiva de conexiones proyectadas [8].

Adicionalmente, revisando la eficiencia en el uso del espectro, diversos estudios muestran que los operadores de servicios de telecomunicaciones inalámbricas tienen un promedio relativamente bajo en uso del espectro asignado, tanto en áreas rurales como urbanas [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15], lo cual se convierte en un problema que soporta a la escasez de espectro.

Como una posible solución a estos problemas, se plantea un giro en la administración del espectro, yendo desde una gestión estática hacia una gestión dinámica del espectro (DSM) [1], donde los accesos sean también dinámicos, como el acceso dinámico al espectro (DSA). DSA es una forma de acceso que mejora la capacidad de la red y la eficiencia en el uso del espectro [16], respecto del modelo rígido tradicionalmente usado. Dicho de otra manera, se plantea que la disponibilidad del espectro con licencia pueda ser accesada dinámicamente para prestar el mismo u otros servicios que brinde un nuevo operador o el mismo operador incumbente [17], pues DSA tiene el beneficio de aumentar la densidad de usuarios y mejorar la eficiencia en el uso del espectro electromagnético [18]. En el futuro se deberían adoptar modelos con DSA, para poder compartir el espectro en varias dimensiones, como frecuencia, tiempo, espacio y sentido de propagación, usándolo en múltiples contextos; pero para hacerlo, se requiere de la evolución de los modelos regulatorios y de negocio, así como la incorporación de tecnologías de bases de datos con capacidades de detección [19].

DSA permite que nuevos sistemas no licenciados, denominados sistemas secundarios, puedan hacer uso de segmentos de un espectro licenciado siempre que se cumpla con dos factores claves para su operación, que los segmentos estén vacantes y que su uso no produzca interferencia al operador licenciado [20], tal como lo hace la Radio Cognitiva (CR), tecnología que implementa DSA para contrarrestar la escasez de espectro [21]. CR es un paradigma de DSA que permite el reuso inteligente de la disponibilidad espectral, que tiene el objetivo de aumentar el uso del espectro electromagnético [22].

Es decir, las tecnologías que combinan DSA y CR aparecen como una solución diferente para menguar los problemas de saturación del espectro [23], ya que sus dispositivos tienen la capacidad de buscar, en el espectro de sistemas incumbentes, canales que no estén siendo utilizados, denominados espacios en blanco (WS), para reusarlos. Así, por ejemplo, los segmentos de frecuencia en banda de TV que se encuentren disponibles, conocidos como espacios en blanco de TV (TVWS), podrían ser utilizados por sistemas con capacidades DSA y CR para uso secundario [24].

Los reguladores, al tomar decisiones como el cambio de la TV analógica a la TV digital, habrían logrado aliviar un poco el problema en zonas urbanas y rurales, pues ha quedado espectro sin usar, creando así TVWS permanentes; alentando la definición de estándares como IEEE802.22 [25], que especifica la operación del sistema conocido como Red de Acceso Regional Inalámbrico (WRAN), el cual es un sistema DSA basado en CR que administra de una manera inteligente los TVWS para su operación en áreas rurales. El uso de sistemas basados en TVWS promete ser una alternativa de bajo costo para la provisión de servicios de telecomunicaciones en zonas rurales y pueblos aislados [26].

Pero, los TVWS también pueden ser encontrados al interior de los edificios ubicados en zonas urbanas tanto de forma intermitente (es decir, temporal), como fija (i.e. espacial) [27], recordando que los TVWS temporales aparecen por la combinación e interacción instantánea de fenómenos tales como el shadowing, ruido blanco y otras posibles interferencias, mientras que los TVWS espaciales, se pueden formar por falta de cobertura, o por condiciones específicas de la geometría y arquitectura de los edificios [12].

En general, los TVWS pueden determinarse utilizando variadas técnicas que pueden consolidarse en dos grandes grupos: una de ellas, a través de información brindada en bases de datos geolocalizadas [28], y la otra, a través de mediciones locales [17] [21] [29]. En el caso de interiores de edificios ubicados en zonas urbanas densas, como el interior de un edificio inteligente (SB), la información de disponibilidad brindada por las bases de datos deberá ser ajustada, pues ya se ha demostrado que la cantidad de

TVWS en el entorno exterior de edificios ubicados en zonas urbanas densas es menor que los TVWS interiores [3] [27].

Sin embargo, ya sea ajustando la información las de bases de datos [30], o utilizando mediciones espectrales interiores, la información de disponibilidad espectral solamente indicaría la presencia o ausencia del operador incumbente (e.g. los TVWS interiores). Para que la disponibilidad espectral sea efectiva, es decir reutilizable en el interior de un SB, será necesario tomar en cuenta una condición adicional, la posible interferencia local que podrían producir los sistemas inalámbricos de corto alcance basados en DSA y CR hacia los usuarios de la red incumbente desplegados al interior del SB [21] [27]. Por esta razón, la determinación de la disponibilidad espectral efectiva (ESA) al interior de un edificio, se convierte en un reto actual porque tendría el beneficio de poder planificar, sin necesidad de utilizar nuevas bandas espectrales, la operación de servicios y sistemas inalámbricos en interiores de SB, tales como las redes cognitivas de sensores inalámbricos y las redes domésticas inalámbricas cognitivas.

Para operar en interiores, un sistema basado en CR debe cumplir una primera fase, que es sensar el espectro y determinar la disponibilidad existente. El método de sensado más utilizado es el sensado del nivel de potencia del espectro, que se conoce como detección de energía [31], porque tiene una complejidad baja y no requiere información previa del comportamiento del espectro primario; para determinar la disponibilidad, el dispositivo cognitivo, mide la energía recibida y la compara con un umbral, si la energía recibida estuviera por debajo del umbral, el espectro está disponible; teniéndose, además evidencia de que se tiene evidencia de que el transmisor primario está apagado o se encuentra lejos [32]. El problema asociado a este método es que se hace un gran gasto de energía [33].

Adicionalmente, cuando se determina la disponibilidad temporal, mientras más largo el tiempo de una sesión de sensado del espectro, se obtienen resultados de disponibilidad con mucha precisión, pero en cambio, se reducirá el tiempo asignado a la transmisión del dispositivo [22]. Y, en el peor de los casos, se podría perder la oportunidad de transmitir; dicho de otra manera, el método del sensado de energía puede

llegar a consumir grandes cantidades de energía y tiempo, convirtiéndose en otro problema importante [33].

Una solución a este nuevo problema sería que el sistema secundario no encuentre la disponibilidad espectral en tiempo real, sino que los dispositivos puedan conocerla con anticipación; es decir, se disponga de un algoritmo de predicción de los estados del espectro. Entre otros, los métodos de predicción de disponibilidad espectral más utilizados se basan en Inferencia Bayesiana, Modelos Ocultos de Markov, Redes Neuronales Artificiales y Modelos Autorregresivos [34]. Esta solución permite la mejora de la eficiencia en el uso del espectro electromagnético, por lo que se convierte en una opción para nada despreciable para compartir el espectro, permitiendo así una coexistencia o cooperación entre sistemas que operen tanto en el segmento licenciado como en el no licenciado [35].

Con estos antecedentes en este trabajo doctoral, en primera instancia, se modelará la ESA en banda de TV, en base a mediciones de nivel de potencia en interiores de edificios, diferenciando entre disponibilidad espacial y temporal. Se usará la banda de TV por sus características generales de propagación, tal como la facilidad de sobreponerse a obstáculos como son las paredes internas del edificio [36] [37]. Los sistemas interiores que utilizarían la ESA serían sistemas de corto alcance basados en CR, que podrían utilizar la arquitectura de cualquier tipo de tecnología actual (e.g. Wifi, GSM, LTE, WSN) [38].

Luego, teniendo en cuenta que la disponibilidad encontrada es exclusiva del lugar de medición, en este trabajo doctoral, se diseñará un mecanismo novedoso que estime la ESA en todo el ambiente interior de un edificio, sin necesidad de mediciones; aunque para cumplir tal objetivo, los modelos de propagación que se usarán en el mecanismo propuesto deberán ser previamente validados con mediciones. Sin embargo, es importante aclarar que debido a que los WS no son exclusivos de la banda de TV, el presente estudio podría replicarse en otras bandas primarias, usando procedimientos similares.



Adicionalmente, también este trabajo doctoral contempla introducir como novedad, un mecanismo de predicción del espectro, basado en Aprendizaje Profundo y en técnicas de modulación/demodulación, que permita determinar la disponibilidad espectral en interiores de edificios.

Las motivaciones para realizar este trabajo doctoral provienen de diferentes aristas, una de ellas es el hecho de que los nuevos edificios inteligentes deberían ser diseñados con el fin de optimizar el uso del espectro electromagnético disponible, de la misma manera que optimiza todos sus procesos; otra motivación, es fundamentar el desarrollo de nuevos dispositivos de corto alcance con capacidades radio cognitivas basados en DSA; y, por otro lado, alentar el reuso del espectro actual antes de utilizar nuevas bandas de frecuencias.

## **1.2. OBJETIVOS**

Los objetivos propuestos en este trabajo doctoral son los siguientes:

- Modelar y caracterizar la disponibilidad de la banda de TV en ubicaciones al interior de edificios ubicados en zonas urbanas densas, usando campañas de mediciones.
- Desarrollar un mecanismo de estimación de disponibilidad espacial efectiva de la banda de TV, en el interior de edificios.
- Desarrollar un mecanismo de predicción de disponibilidad temporal efectiva en ubicaciones al interior de edificios

### 1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La estructura de la Tesis se muestra en la Fig. 1.1, donde se describe la interacción entre los capítulos propuestos y sus resultados. El Capítulo 2 establece el estado del arte sobre la determinación de la disponibilidad del espectro usando las características de DSA, CR y TVWS; se establecen las condiciones para el desarrollo de DSA y el modelo de administración dinámica del espectro, también se hace una descripción de TVWS, los métodos para su determinación, así como las diferencias básicas del uso de bases de datos geolocalizadas de TVWS y el sensado del espectro; también se describen las bondades de CR.

Usando estos conceptos, en el Capítulo 3, se definen tanto el escenario del entorno de los edificios de medición, como el escenario y sistema de medición usado; se realiza el modelamiento de la disponibilidad, estableciendo diferencias entre la disponibilidad espacial y la temporal, el análisis de dos casos de medición dentro de edificios, así como un análisis de disponibilidad conjunta de canales de TV y de la capacidad disponible total al interior del edificio.

En el Capítulo 4 se definen los parámetros del escenario de estudio, se modelan las condiciones de interferencia necesaria para obtener la disponibilidad espacial efectiva, se diseña el proceso de validación de las condiciones de interferencia, se obtiene el modelo de la disponibilidad efectiva espacial del espectro (ESA), se consideran los efectos del shadowing, y se realiza una estimación de la ESA en edificios de gran altura.

Finalmente, en el Capítulo 5, se establece el escenario para la predicción del espectro y su disponibilidad temporo-espacial, se introduce un proceso de modulación/demodulación en fase para la predicción del espectro, se describe el modelo LSTM usado para la predicción y se realiza un análisis de sus resultados.

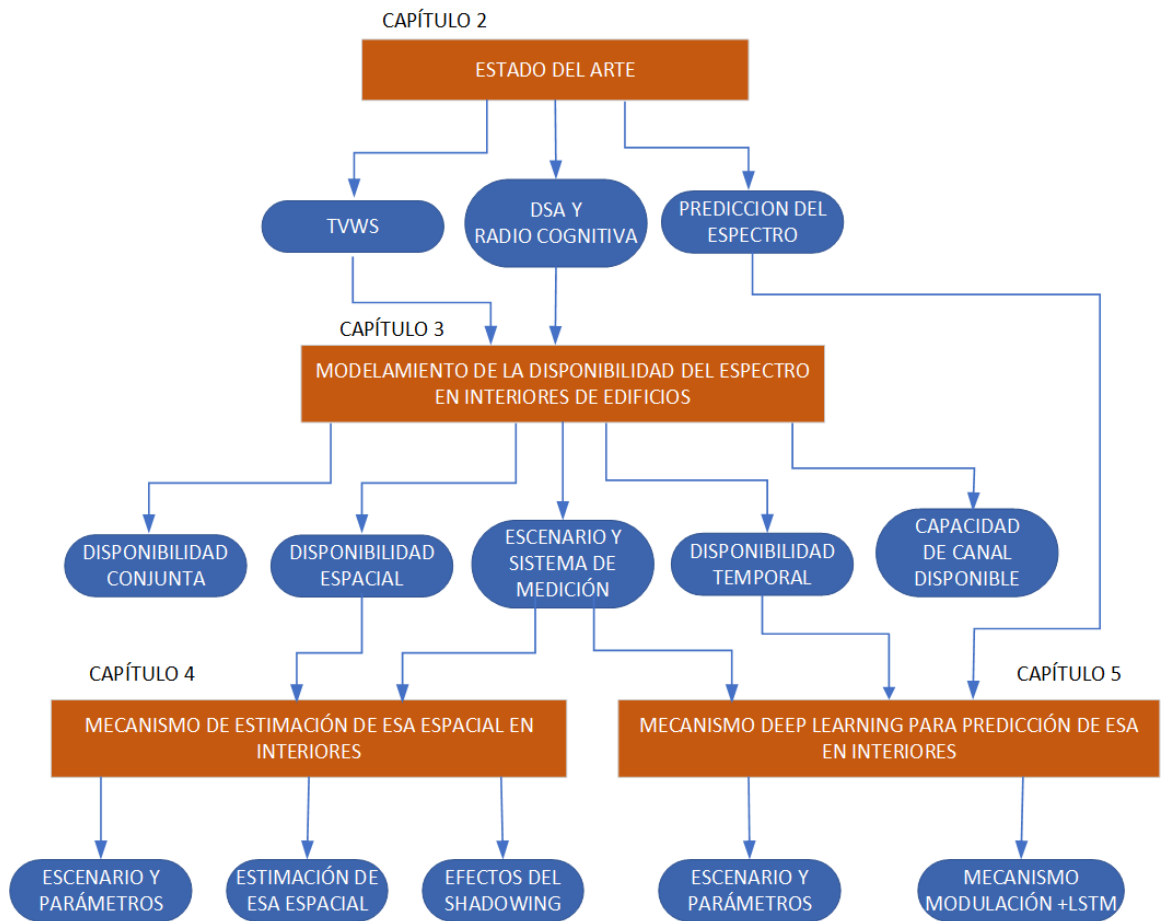


Fig. 1.1 Estructura de la Tesis

## 1.4. RESULTADOS OBTENIDOS

Parte de los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo doctoral ya se ha publicado en varias conferencias internacionales y en una revista especializada. La lista de trabajos publicados es la siguiente:

- Medina, Washington; Novillo, Francisco; Chancay, Eduardo; Romero, Juan. 2020. "Mechanism to Estimate Effective Spectrum Availability Inside Smart Buildings." *Electronics Journal* 9, no. 8: 1244.
- Washington Medina, Francisco Novillo, Eduardo Chancay, Juan Romero-Arguello, Discovering Shadowing Effects Over Effective Spectrum Availability Inside Smart Buildings for Cognitive Short Range Systems Operation, IEEE SARNOFF 2019
- Washington Medina, Francisco Novillo, Eduardo Chancay, Juan Romero-Arguello, Characterizing Effective Spectral Opportunities and Shadowing Influence Inside Large Buildings for Short Range CRWS Use, LATINCOM 2019
- Medina W., Gomez J., Novillo F., Evaluating channel capacity opportunities for potential use by short range devices based on OSA, 2016 IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting, ETCM 2016
- Medina, W., Gomez, J., Novillo, F., Romero-Arguello, J., Availability of adjacent TV channels inside buildings of dense urban scenarios for use of short-range devices with OSA capabilities, 2016 8th IEEE Latin-American Conference on Communications, LATINCOM 2016
- Novillo F., Medina W., Gomez J., Channel Availability Characterization in TV bands for OSA devices inside buildings, *IEEE Latin America Transactions* 14(6),7555224, pp. 2592-2597.
- Gomez J., Medina W., Novillo F., Modeling channel availability in TV bands for devices with OSA capabilities in urban zones, 2015 7th IEEE Latin-American Conference on Communications, LATINCOM 2015.



---

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

En este capítulo se recogen los estudios actualizados sobre DSA, RC, TVWS y Predicción del espectro.

### 2.1. ESTADO DEL ARTE EN DSA Y CR

La administración del espectro electromagnético, basada en el paradigma DSA se caracteriza por permitir compartir el espectro cuando no esté siendo usado por el operador incumbente, pero, sin que se le produzca interferencia a su operación; el operador incumbente se denomina Sistema Primario (PS), mientras que el operador que hace uso dinámico del espectro es denominado Sistema Secundario (SS) [39]. Es importante anotar que los sistemas inalámbricos basados en Radio Cognitiva (CR) utilizan las características de DSA con el fin de hacer un uso eficiente del espectro [39] [40]. Los sistemas inalámbricos basados en CR tienen la funcionalidad de cambiar inteligentemente los parámetros de transmisión/recepción a fin de mantener una continuidad en el servicio a pesar de utilizar la disponibilidad variante en el tiempo de segmentos del espectro asignado un PS, es decir, una banda primaria [23]. Para su funcionamiento, un SS basado en CR, debe realizar un primer proceso, el cual es encontrar disponibilidad en la banda espectral de algún PS para que, luego de cumplir con un conjunto de políticas, pueda ser considerada ESA y ser usada de una manera oportunistica e inteligente [23].

En la actualidad hay un gran esfuerzo para demostrar el uso de la disponibilidad de WS con sistemas cognitivos; así por ejemplo, [41] es un estudio teórico con predicción estadística de la ocupación del espectro percibida por nodos de radio cognitiva, considerando escenarios y posición de nodos reales; por otro lado, [42] propone la utilización de los canales lógicos de GSM para transmitir un canal baliza cognitiva (CBC) quien llevaría la información que se necesita para implementar DSA usando una infraestructura centralizada.

Para el caso de disponibilidad en el interior de un edificio, se ha propuesto un método que, a partir de la información proporcionada por las bases de datos, y

realizando mediciones interiores en sitios considerados estratégicos, se pueda estimar la disponibilidad espectral en cualquier otra ubicación interior del edificio [43]. También se ha presentado un estudio que permitiría a los SS basados en CR usar, en el interior de una edificación, todo el ancho de banda que utilizan los operadores de TV. Dicho ancho de banda se compone de los espacios en blanco (TVWS) y los espacios grises de la banda de TV (TVGS) disponibles [44], y pueden usarse siempre y cuando los SS transmitan con niveles de potencia muy bajos respecto de los niveles de potencia emitidos por los operadores incumbentes.

En otra propuesta, [45] simula la operación en exteriores de un SS que puede operar cognitivamente en banda ISM con TVWS disponibles, comparando teóricamente la capacidad del SS operando en ambas bandas, tanto en ambientes rurales como urbanos, y tomando en cuenta restricciones por posibles condiciones de interferencia entre los SU y los PU.

Otro trabajo [46] intenta simular el despliegue de un sistema autónomo LTE que opere en la banda ISM a 5 GHz, compartiendo espectro con dispositivos Wi-Fi; las simulaciones muestran que el sistema LTE independiente podría proporcionar el doble de capacidad y cobertura que la red Wi-Fi.

## **2.2. ESTADO DEL ARTE EN TVWS**

Para tratar de mejorar la información de disponibilidad del espectro en exteriores, se ha presentado una propuesta [47] que se basa en un conjunto de mediciones cooperativas del espectro en ambientes que simulen desvanecimiento tipo Raleigh, utilizando un algoritmo con adaptación del umbral de referencia. De la misma manera, se ha propuesto mejorar en exteriores, la disponibilidad del espectro de TV realizando una corrección a las bases de datos especializadas utilizando la información brindada en los mapas de cobertura proporcionados por los PS [30].

Los TVWS pronosticados por una base de datos geolocalizada de disponibilidad de espectro se compararon con los TVWS obtenidos por medición [48], encontrando que puede haber una gran diferencia entre ellos, especialmente en sitios donde la naturaleza o construcciones estructurales presentan obstáculos físicos en la trayectoria de la propagación; razón por la que, en dicho estudio, se sugiere que los pronósticos de las bases de datos geolocalizadas tendrían que compensarse con mediciones en tiempo real, para obtener una mayor precisión. Igualmente, [30] ha propuesto mejorar en exteriores la disponibilidad del espectro de TV, realizando una corrección a las bases de datos especializadas utilizando la información brindada en los mapas de cobertura proporcionados por los PS.

En otro sentido [45] propone realizar una corrección teórica a la información de las bases de datos especializadas, proponiendo una corrección en el cálculo de la disponibilidad espectral considerando que las emisiones de los canales de TV son independientes entre sí, pero asumiendo que ellas no son idénticamente distribuidas.

Un estudio [49] intenta encontrar TVWS efectivos para habilitar una infraestructura de acceso de última milla de bajo costo para las regiones rurales, encontrándose que la cantidad efectiva de TVWS disponible en las regiones rurales puede ser menor que la cantidad de TVWS informada por las bases de datos geolocalizadas; considerando que posiblemente se deba a la interferencia hacia los usuarios primarios (PU).

En Verulam, Sudáfrica, [48] realiza un estudio comparativo entre los TVWS medidos y los pronosticados por una base de datos geolocalizada de disponibilidad de espectro, mostrando que, en sitios con un bloqueo físico, la diferencia en la comparación de TVWS puede ser muy grande; por esta razón, este estudio sugiere que, para una mayor precisión, la información de la base de datos geolocalizada de TVWS debería ser compensada con mediciones en tiempo real.

Para el caso de disponibilidad de espectro dentro de un edificio, un estudio propone un modelo para estimar el presupuesto de enlace de TVWS [50]; ese modelo fue determinado tomando medidas internas en algunos sitios dentro de un



edificio y comparándolo con otros modelos, obteniéndose buenos resultados en términos de error cuadrático medio. Otro estudio en interiores propone un sistema híbrido que combina Broadband Power Line Communication (BPLC) con un sistema radio cognitivo que usa TVWS para extender la capacidad del sistema BPLC en VHF, formándose un sistema VHF TVWS BPLC MIMO [51]; los resultados reportan un incremento significativo en la capacidad del sistema respecto al BPLC original.

Además, un estudio experimental determina tanto el comportamiento como el modelo estadístico de la disponibilidad del espectro en el interior de un edificio en Guayaquil-Ecuador [27], encontrando también la disponibilidad conjunta de los canales de varios operadores de televisión en su interior y determinando la capacidad nominal que podría estar disponible para ser utilizado por los SS basados en CR. Otros dos trabajos utilizan el concepto de ESA, [52] para caracterizar las oportunidades de espectro disponibles dentro de los edificios, con lo que se comprueba que allí los SR-CRWS podrían funcionar como SS; y [53] para enfocarse en descubrir el efecto del fenómeno de shadowing sobre la disponibilidad de espectro en el interior de edificios.

### **2.3. ESTADO DEL ARTE EN PREDICCIÓN DEL ESPECTRO**

Las bases de datos geolocalizadas que contienen información de la disponibilidad espectral se han venido utilizando para compartir el espectro entre varios sistemas, especialmente para exteriores; sin embargo, en [48] se realizó un estudio comparativo entre predicciones realizadas a partir de información de una base de datos geolocalizada en África y mediciones realizadas en el mismo sitio. Para este caso, se encontró que las predicciones mejoran si se utiliza una retroalimentación en tiempo real de mediciones. El método de predicción usado es una herramienta propia de las bases de datos geolocalizadas.

Por otro lado, un estudio propone predecir la disponibilidad espectral en base al conocimiento del comportamiento de los usuarios primarios; para hacerlo se utiliza un modelo Duty Cycle [54] del comportamiento de los usuarios y luego se realiza la predicción de ese comportamiento utilizando una cadena de Markov de dos estados. Se reportan resultados con precisión entre 91.67% y 25%, siendo más apropiados solamente para canales donde la actividad de los usuarios primarios es moderada o muy extensa.

Otro estudio, en cambio, propone un modelo de predicción de los estados de un transmisor, con una Red Neuronal [55]; para el efecto, se tomaron mediciones y se establecieron los estados durante 1 hora con granulación de 1 minuto. La red neuronal presenta una gran precisión al predecir el comportamiento del estado del transmisor, pero destacando que el error se incrementa a medida que la variabilidad de los datos va aumentando. Se presenta también, en [56] un estudio de la predicción de la ocupación del espectro basado en la técnica de minería de datos, y utilizando información de ocupación del espectro disponible en bases de datos.

A diferencia del anterior, un trabajo sobre predicción de disponibilidad espectral basada en minería de datos se presenta en [57]. Este estudio muestra también el hecho de que los errores en la predicción aumentan siempre que los datos se muestren más fluctuantes. En cambio, en [58] se hace una comparación entre los métodos de predicción tradicionales basados en series de tiempo, y los modelos basados en aprendizaje profundo. Aquí se concluye que, para las bandas de TV, donde el comportamiento de los usuarios primarios es casi estático, los modelos tradicionales basados en serie de tiempo son muy buenos predictores de la disponibilidad espectral. Por otro lado, en bandas asignadas a GSM, el comportamiento de los usuarios primarios es muy dinámico y no estacionario, razón por la que los modelos de aprendizaje profundo son más apropiados para la predicción de la disponibilidad espectral.

En [31] se realiza un estudio predictivo de disponibilidad espectral para comunicaciones aeroespaciales, basado en aprendizaje profundo. Este estudio se lo realizó en la banda comprendida entre los 3MHz y los 5.4MHz. El comportamiento

de la disponibilidad espectral permite, en este caso conseguir una precisión de hasta el 98%.

Adicionalmente, se han realizado estudios sobre la utilidad de conocer el comportamiento de la disponibilidad espectral; en [59] se propone un acceso al espectro basado en un modelo de cadenas de Markov modificado a tres estados, obteniéndose mejoras en el acceso a canales disponibles, especialmente en lugares donde la relación señal ruido es baja. Otro estudio propone un marco referencial para tomar decisiones sobre el acceso al espectro en comunicaciones satelitales considerando la operación de sistemas Jammers cognitivos [60]. Así mismo, en [44] se realiza un estudio donde se muestran los beneficios de operar sistemas heterogéneos basados en la cooperación de los espacios en blanco de televisión (TVWS) y sistemas Wi-Fi para transmitir ráfagas de video en forma adaptativa y dinámica. Este mismo estudio recomienda el uso de los TVWS para cobertura interna de sistemas cognitivos, debido a sus características de propagación.

En general, los estudios sobre predicción espectral se basan en conocimiento a priori del comportamiento de los usuarios, o de la disponibilidad espectral [61], concluyendo en este caso, que los parámetros así obtenidos permitirían brindar, a los sistemas cognitivos, un mejor acceso hacia los canales disponibles.

Trabajos recientes sobre predicción de disponibilidad espectral basados en redes neuronales como [62] también utilizan la información histórica del comportamiento de los usuarios primarios, demostrando además que la predicción combinada con el sensado del espectro mejora los resultados esperados. Actualmente, los esfuerzos de predicción espectral se los realiza con modelos Long Short-Time Memory (LSTM) puesto que controlan mejor los desvanecimientos o crecimientos exponenciales de los gradientes, y además brindan oportunidades para nuevos retos e ideas [63].

---

### **3. MODELADO DE LA DISPONIBILIDAD DEL ESPECTRO EN EL INTERIOR DE EDIFICIOS**

---

Encontrar, caracterizar y modelar la disponibilidad espectral al interior de un edificio sigue constituyéndose en un desafío, especialmente por la heterogeneidad en los diseños y materiales de los edificios. El presente capítulo propone analizar la posibilidad de encontrar segmentos de espectro de bandas licenciadas de sistemas con gran cobertura, localizados dentro de edificios en zonas urbanas; en particular, modelar y caracterizar la disponibilidad, tanto individual como en forma conjunta, de los canales en la banda de TV, con el objetivo de que dispositivos cognitivos de corto alcance basados en DSA puedan operar como SS, es decir utilizando los TVWS interiores efectivos de un edificio, preferentemente en sus plantas bajas; adicionalmente, los resultados de este capítulo pueden usarse como entrada en propuestas sobre asignación dinámica de canales para redes cognitivas de sensores inalámbricos como los trabajos [64] [65].

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

El aumento de sistemas inalámbricos en zonas urbanas está causando un incremento en el tráfico de datos [6], provocando una mayor demanda de recursos radio, los cuales son escasos. La poca o ninguna flexibilidad del esquema de administración del espectro impediría satisfacer los requerimientos de nuevos servicios en las redes; razón por la cual, encontrar escenarios congestionados debido a la falta de canales se vuelve una realidad. Se puede decir que el modelo de la regulación en telecomunicaciones vigente asociado el rápido incremento de dispositivos y sistemas inalámbricos en las zonas urbanas, tanto de los sistemas licenciados como de los compartidos, causan el problema denominado escasez de espectro [66].

Las soluciones inmediatas que mitigan estos problemas están enfocadas al reúso de los recursos radio asignados a cada operador o sistema, como, por ejemplo, el despliegue de celdas de pequeña cobertura en sistemas celulares, el desarrollo de mecanismos de reasignación automática en Wi-Fi [35], o el diseño de sistemas Wi-Fi ultra densos [67]; sin embargo, son solamente soluciones temporales que pierden eficacia a medida que la densidad de usuarios se incrementa, porque el espectro asignado a cada sistema es finito.

Por otro lado, las tecnologías con DSA basadas en técnicas de CR aparecen como una solución diferente para menguar los problemas de saturación del espectro [68], ya que los dispositivos basados en esta tecnología tienen la capacidad de buscar canales que no estén siendo utilizados, denominados espacios en blanco (WS), y reusarlos. Así, por ejemplo, los segmentos de frecuencia en banda de TV que se encuentren disponibles, conocidos como espacios en blanco de TV (TVWS), podrían ser utilizados por otros dispositivos con capacidades DSA que harían un uso secundario de estos [24].

En zonas rurales, los TVWS se incrementarían porque no suele haber cobertura de los sistemas de TV en regiones remotas, y por otro lado, con el cambio de la TV analógica a la TV digital, ha quedado espectro sin usar, creando así TVWS permanentes. Para la zona rural, ya se han especificado estándares basados en CR y TVWS, i.e. IEEE802.22 [25], que prometen ser una alternativa de bajo costo para la provisión de servicios de telecomunicaciones en zonas rurales y pueblos aislados [26]. Estos estándares definen a los sistemas conocidos como Red de Acceso Regional Inalámbrico (WRAN).

De igual manera, tanto las zonas urbanas como los interiores de edificios disponen de TVWS espaciales y temporales, abundando más en el interior de edificios [27]. Existen bases de datos geolocalizadas de TVWS [28], que pueden ser utilizadas en las zonas rurales y aun en exteriores de las zonas urbanas, pero esto no sucede en el interior de edificios, donde habría que hacer ajustes a la información de las bases de datos; sin embargo, se puede obtener información de la disponibilidad de TVWS realizando mediciones locales y tomando la decisión respectiva [17].

Aunque los espacios en blanco no son exclusivos de la banda de TV, en este trabajo se propone el estudio de la disponibilidad de las frecuencias en la banda de TV por sus características generales de propagación en interiores, tal como la facilidad de sobreponerse a obstáculos como paredes interiores [36] [37]; sin embargo, es importante aclarar que, debido a que los WS no son exclusivos de la banda de TV, el presente estudio podría replicarse con otras bandas primarias [69] [70].

### 3.2. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO

De acuerdo con lo expresado anteriormente, el escenario de este estudio se centra en edificios de zonas urbanas densas como las que se muestran en la Fig. 3.1, donde se pueden ver tres zonas urbanas densas diferentes de la ciudad de Nanjing, China; en la Fig. 3.1a) se puede observar un sector con un centro comercial, edificios de negocios y residenciales; la Fig. 3.1b) muestra una combinación de edificios de oficinas y residenciales; mientras que, en la Fig. 3.1c) se muestran edificios residenciales.



Fig. 3.1 Zonas urbanas densas de la ciudad de Nanjing, China

Para efectos de este trabajo, el escenario se simula con un edificio situado en un sector denso de una gran ciudad, donde existe cobertura de un sistema incumbente,

como el de un operador de TV abierta, tal como se muestra en la Fig. 3.2. En el edificio se asumen dos despliegues de usuarios, uno de usuarios del sistema incumbente, y otro, de sistemas de corto alcance instalados en cada departamento del edificio, que están basados en CR y DSA; los usuarios del sistema incumbente deberán estar protegidos contra la posible interferencia que puedan causar los SS si operan cognitivamente en la frecuencia del operador incumbente.

En la misma Fig. 3.2 se puede observar que en los techos de los edificios se ha considerado una antena receptora del sistema incumbente, que forma parte del despliegue de PUs en el interior del edificio; este sistema receptor se complementa con dispositivos de recepción y distribución de la señal a cada departamento a través de una red cableada, a fin de que los PUs se encuentren debidamente protegidos de las interferencias que les pudieran producir los SS.

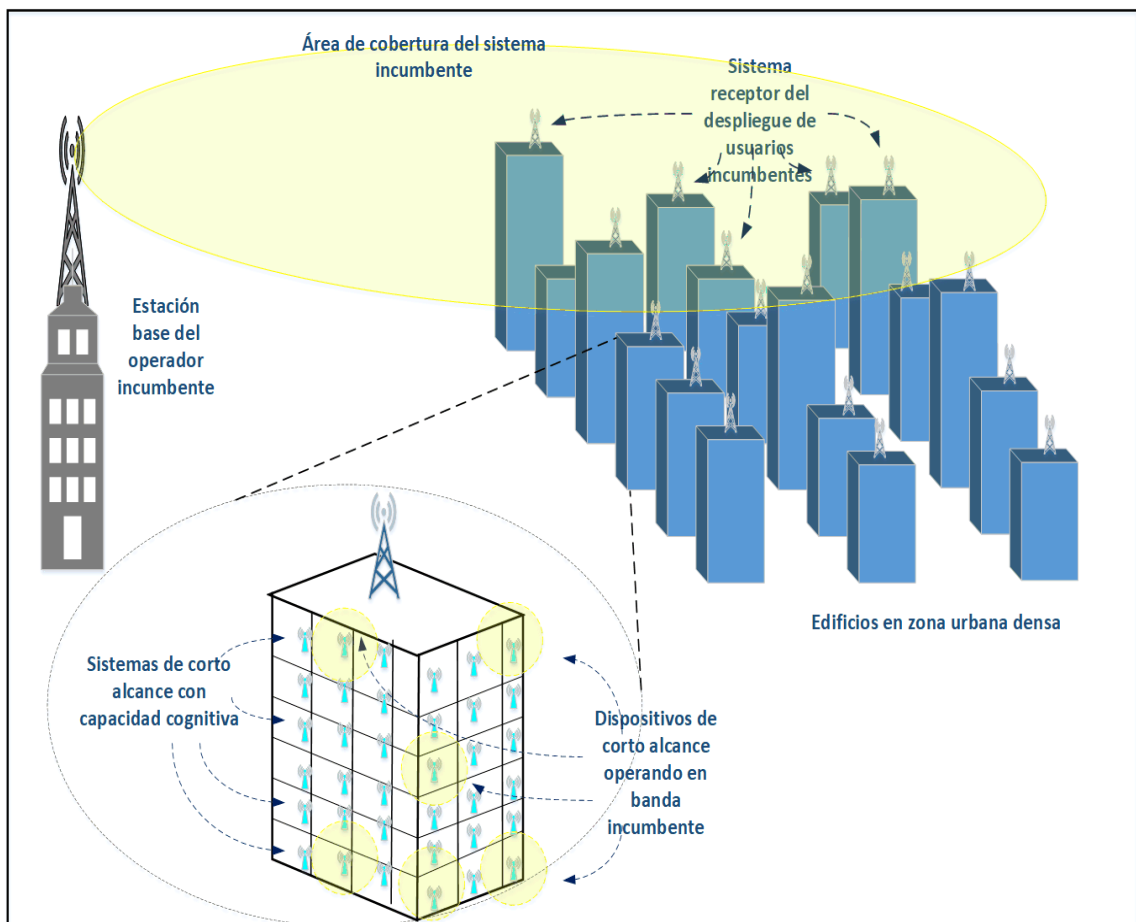


Fig. 3.2 Edificio con despliegue de sistemas de corto alcance cognitivos y despliegue de usuarios del sistema incumbente.

### 3.3. SISTEMA DE MEDICIÓN

El sistema de medición consta de un USRP N-210, que es un dispositivo de radio definido por software (SDR) programable, una antena Discone y una computadora personal, tal como se muestra en la Fig. 3.3; los tres dispositivos permitirán la captura, procesamiento y almacenamiento de los niveles de potencia recibida. La recepción de los niveles de potencia será realizada con la antena DISCONE SIRIO SD-3000, que tiene una ganancia unitaria y un patrón de radiación omnidireccional, pudiendo receptar entre 300-3000 MHz; la antena está conectada con el USRP N-210 a través de un cable de baja pérdida.

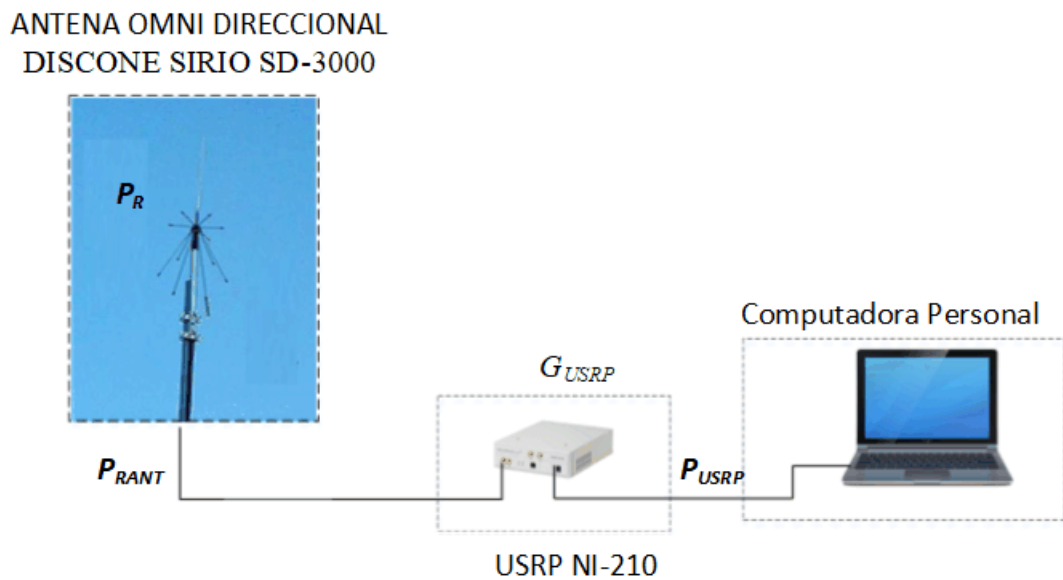


Fig. 3.3 Sistema de medición para la obtención de los niveles de potencia

El USRP N-210, que tiene un amplificador interno con ganancia  $G_{USRP}$ , recibirá, filtrará y amplificará la información del nivel de potencia, que será almacenada en la computadora personal, para luego ser procesada y analizada usando MATLAB. Debido a que la ganancia de la antena Discone es unitaria, entonces



$$P_{R_{ant}} = P_R \quad (3.1)$$

pero la potencia en el dispositivo de medición será:

$$P_{USRP} = P_{R_{ant}} + G_{USRP} - L_{cable} - L_{cc} \quad (3.2)$$

De acuerdo con (2), la potencia medida por el dispositivo  $P_{USRP}$  no es la potencia en antena  $P_R$ , y que, para que sean iguales, la ganancia del amplificador interno del USRP  $G_{USRP}$  debe ser ajustada para compensar las pérdidas  $L_{cable}$  y  $L_{cc}$  que se producen en la línea de transmisión y en los conectores respectivamente.

### **3.4. MODELADO DEL PROCESO DE DETERMINACIÓN DE DISPONIBILIDAD**

Este análisis está enfocado en un segmento de ancho de banda licenciado BW, el cual usualmente es dividido en  $N$  canales, donde cada canal  $i$  posee una máscara de  $\Delta f$  Hertz con una separación de  $f_1 + (N + 1)\Delta f$  siendo  $f_1$  la frecuencia central del primer canal del segmento de espectro seleccionado, tal como se especifica en la Fig. 3.4.

Será necesario realizar mediciones en el techo e interior del edificio, además de cumplir ciertas condiciones para establecer la disponibilidad de los canales en estudio; tomando siempre en cuenta que la geometría del edificio y su ubicación real en la zona urbana densa pueden afectar el nivel de la medición y consecuentemente podría cambiarse la disponibilidad de canal.

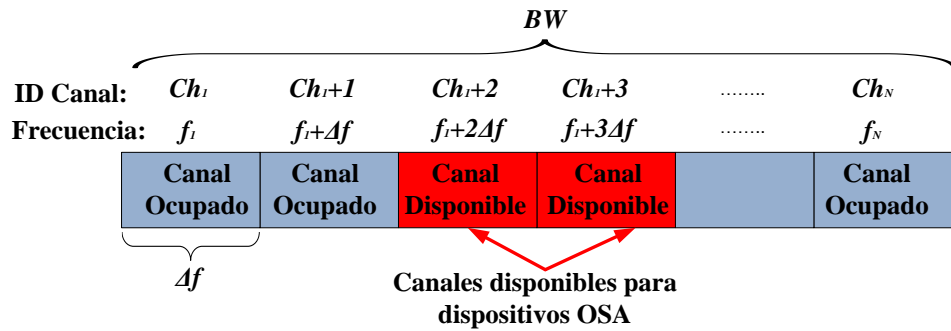


Fig. 3.4 Distribución y ocupación de los canales en un BW.

Para determinar, en cualquier lugar, si un canal está disponible se debe comparar la medición de potencia de la señal recibida con un valor de referencia, que normalmente es la sensibilidad del receptor  $P_{TH}$ , como se indica en la Fig. 3.5, donde se muestra el comportamiento del espectro en un instante dado. En la figura se puede ver, que, si el nivel de potencia de la señal es mayor que el nivel de referencia, el espectro se encuentra ocupado, mientras que, si sucede lo contrario, el espectro se encuentra disponible. Como en una medición siguiente, los valores pueden cambiar, se estima que en la región entre los 550 MHz y 650 MHz va a existir una disponibilidad instantánea variante en el tiempo, mientras que, por ejemplo, entre las frecuencias 900 MHz y 1100MHz la disponibilidad es fija, a no ser que un operador transmita ocasionalmente en esa región.



Fig. 3.5 Determinación de disponibilidad espectral

### 3.4.1. DISPONIBILIDAD ESPACIAL DENTRO DEL EDIFICIO

Los canales que estarían siempre disponibles dentro del edificio son aquellos cuyo nivel de potencia es menor que la potencia de referencia, que, para el caso de banda de TV, es la sensibilidad de un receptor de TV. Aunque, en fábrica, la sensibilidad de los receptores de TV puede llegar normalmente a  $-83$  dBm, porque la medición se hace en un cuarto libre de ruido y con inyección directa de la señal de TV [71] [72] [73], el nivel de la referencia que se toma es  $P_{TH} = -75$  dBm. Y ello se debe a que, tradicionalmente, se considera una señal débil de TV al nivel de  $-60$  dBm en la Unión Europea,  $-65$  dBm en Alemania y Reino Unido, y  $-69$  en Rusia [72] [74]; adicionalmente se estima que fuera de los laboratorios hay un aumento de  $8$  dB en ruido, y, normalmente se estila poner una protección de  $3$  dB [72], por lo que, la referencia tendría , entre  $-71$  dBm y  $-81$  dBm, para los casos antes especificados.

En otras palabras, si la potencia que recibe la antena en el techo del edificio desde la estación base (BS) del sistema primario es menor que  $P_{TH}$ , entonces el espectro estará disponible dentro del edificio, es decir tendrá disponibilidad fija, o espacial, en el interior y podría reusarse desde sitios donde el SS no produzca interferencia. Esto quiere decir, que el nivel de potencia del SS medido en la antena del techo del edificio no deberá ser mayor o igual que el umbral de referencia; es importante hacer notar que, un canal puede estar disponible, pero podría no poder ser reusado desde algunas locaciones al interior del edificio, presumiblemente, los pisos cercanos a la terraza.

Entonces, la disponibilidad fija viene a ser disponibilidad efectiva cuando se encuentran los sitios desde donde puede operar un SS, problema que será enfrentado en el siguiente capítulo; no obstante, se puede hacer una aproximación y encontrar la menor distancia desde la antena del sistema primario del edificio, donde debe ubicarse un SS para no producir interferencia. Para ello, se utilizará el modelo de propagación de interiores Multi Wall Model (MWM) presentado en el COST 231 [75], el cual se representa con la siguiente expresión

$$L_{MWM} = L_{fs} + L_C + \sum_{i=1}^I k_{Wi} L_{Wi} + k_f^{\left[\frac{k_f+2}{k_f+1}-b\right]} L_f \quad (3.3)$$

donde  $L_{fs}$  es la pérdida de espacio libre entre el receptor del sistema primario del edificio y el SS;  $L_{Wi}$  representa la pérdidas en cada pared interna del tipo  $i$ , mientras la cantidad de paredes del tipo  $i$  que se penetra en el recorrido interno es  $k_{Wi}$ ;  $L_C$  es una constante para compensar pérdidas, que suele ser despreciable;  $L_f$  representa la pérdida por losa y  $k_f$  representa la cantidad de losas que se atraviesan; y se complementa con un factor empírico  $b$ .

La Fig. 3.6 muestra a varios SS operando en banda primaria, ubicados a distancias diferentes; para determinar la menor distancia a la que debe estar un SS para que no produzca interferencia a los PUs, se considerará, en este cálculo a los SS que se encuentren exactamente debajo de la antena. Debido a que en este recorrido interno no se atraviesan paredes internas, el término  $\sum_{i=1}^I k_{Wi} L_{Wi} = 0$ ; además si consideramos que no hay pérdidas adicionales para compensar, entonces  $L_C = 0$ . De acuerdo con el reporte [75], se debe considerar el valor de 18.3 dB para  $L_f$ , y el valor empírico de 0.46 para  $b$ .

El modelo MWM, usando las restricciones especificadas, queda expresado de la siguiente manera:

$$L_{MWM} = L_{fs} + k_f^{\left[\frac{k_f+2}{k_f+1}-b\right]} L_f \quad (3.4)$$

donde  $L_{fs}$  se expresa, de acuerdo con [75] de la siguiente manera:

$$L_{fs} = 32.44 + 20 \log(f_{MHz}) + 20 \log(r_{Km}) \quad (3.5)$$

siendo  $f_{MHz}$  la frecuencia de operación en MHz y  $r_{Km}$  la distancia de la ruta de propagación en Km.

La potencia recibida en la antena de la terraza del edificio desde el SS es:

$$P_{SS-PU} = P_{SS} - L_{MWM} \quad (3.6)$$

donde  $P_{SS}$  es la potencia de transmisión del SS.

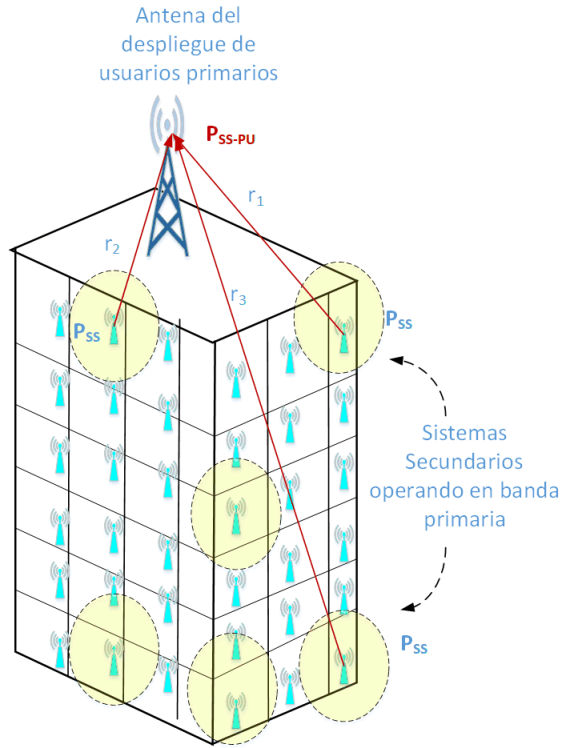


Fig. 3.6 Escenario considerado para obtener una disponibilidad efectiva para los SS

Entonces, para que el SS no interfiera sobre el despliegue de PUs:

$$P_{SS-PU} < P_{TH} \quad (3.7)$$

lo que quiere decir que:

$$L_{MWM} \geq P_{SS} - P_{SS-PU} \quad (3.8)$$

Si la potencia máxima con que transmite un sistema de corto alcance, en la band ISM 2.4 GHz, es  $P_{SS} = +20\text{dBm}$  [76], y considerando que el máximo valor de  $P_{SS-PJ}$  sea el nivel de referencia  $P_{TH} = -75\text{ dBm}$ , entonces, la pérdida por MWM tiene que ser  $L_{MWM} \geq 95\text{ dB}$  para que no haya interferencia de los SS.

Considerando todos los parámetros antes especificados, se calcula la pérdida de propagación con MWM, usando  $f_{MHz} = 600\text{ MHz}$ , estimando una altura entre pisos de 3 m, que los SS están ubicados en la losa, y que la antena en la terraza del edificio se encuentra a una altura de 1.5 m. Los resultados se muestran en la Tabla 3-1, de donde se puede deducir que en los tres primeros pisos bajo la terraza no habría disponibilidad efectiva, y que los SS podrían funcionar sin restricciones a partir del cuarto piso; de todas maneras, las restricciones en el tercer piso bajo la terraza son para ubicaciones exactamente debajo de la antena, por lo que podría haber disponibilidad efectiva en departamentos alejados del centro del piso.

Estos resultados permiten afirmar que, en cualquier edificio, a partir del cuarto piso debajo de la terraza, los SS podrían hacer uso del espectro disponible fijo o de la disponibilidad temporal en cualquier lugar al interior del edificio. Es necesario aclarar que en este resultado no se han considerados las reflexiones desde edificios vecinos, ni el ángulo de incidencia de la propagación, lo cual podría hacer variar la Tabla 3-1; desafío que será resuelto en el capítulo siguiente.

### **3.4.2. DISPONIBILIDAD TEMPORAL DENTRO DEL EDIFICIO**

Para encontrar la disponibilidad temporal del espectro, será necesario tomar mediciones de los niveles de potencia del espectro de TV y determinar la disponibilidad total del espectro al interior del edificio, para luego descontar la disponibilidad fija previamente hallada.

Para encontrar la disponibilidad total al interior del edificio solamente será necesario medir el nivel de potencia  $P_{BS-SS}$  que reciben los SS desde la estación

base del sistema primario, la cual es considerada una interferencia  $I_{BS-SS}$  a la operación del SS y compararla con el nivel de referencia  $P_{TH}$ .

Es decir, un canal estará disponible si cumple la condición:

$$(I_{BS-SS} = P_{BS-SS}) < P_{TH} \quad (3.9)$$

donde  $P_{TH}$  representa la sensibilidad estándar de un receptor en banda de TV.

*Tabla 3-1 PÉRDIDAS DEL MODELO MWM HASTA LA ANTENA DEL SISTEMA PRIMARIO*

$k_f$	$r_{Km}$	$L_{MWM}(\text{dB})$
1	0.0015	46.3
2	0.0045	71.07
3	0.0075	85.57
4	0.015	95.95
5	0.0135	104.16

Esta disponibilidad total será disponibilidad efectiva, es decir pueden reusarla los SS, desde el primer piso hasta el piso ubicado a 15 m de la antena del techo (ver Tabla 3-1), con las restricciones ya anotadas.

### 3.5. MODELADO DE LA DISPONIBILIDAD DE CANALES

En esta sección se realizará el modelado de un canal, de canales conjuntos y de la capacidad de canal disponible

#### 3.5.1. MODELADO DE LA DISPONIBILIDAD DE UN CANAL

Las mediciones espectrales son altamente variables en forma temporal debido a diversos factores tales como la geografía, ruido, shadowing y otros; pero, en forma general, se representan de la siguiente manera [77]:

$$P_R[BW, n] = P_{BSR}[BW, n] + P_{Noise}[BW, n] + I_x[BW, n] \quad (3.10)$$

donde  $P_R[BW, n]$  representa a los niveles de potencia en banda de TV medidos en la ubicación de un SS;  $P_{BSR}[BW, n]$  es la potencia recibida desde cada BS de la banda de TV,  $P_{Noise}[BW, n]$  contiene los niveles del ruido atmosférico considerado como ruido blanco en la banda de TV, el cual es un proceso gaussiano ( $G(0, \sigma^2)$ ) [77]; e  $I_x[BW, n]$  comprende todas las señales interferentes de otras fuentes en banda de TV; y  $n$  es el instante de medición. Debido a que, en Ecuador, la banda de TV no es compartida y a que los canales tienen bandas de guarda, se puede asumir que las interferencias  $I_x[BW, n]$  son despreciables, entonces:

$$P_R[BW, n] = P_{BSR}[BW, n] + P_{Noise}[BW, n] \quad (3.11)$$

Considerando que las muestras  $P_R[BW, n]$  pertenecen al mismo proceso de medición, y que cada muestra es tomada independientemente de la muestra anterior o de la siguiente, todo el conjunto de muestras constituye un proceso independiente e idénticamente distribuido (IID); además, debido a  $P_{Noise}[BW, n]$ ,  $P_R[BW, n]$  presenta características gaussianas, pasando a ser un proceso estacionario gaussiano, y como tal, es considerado un proceso ergódico [78].



Con este antecedente, una vez obtenido el conjunto de mediciones  $P_R[BW, n]$  del espectro en banda de TV, se procede a determinar los niveles de potencia recibidos por canal; es decir se determina  $P_R[BW_i, n]$ , donde  $i$  representa al número del canal, tal como se muestra con letras verdes en la Fig. 3.7; en esta figura pueden verse varias realizaciones de  $P_R[BW, n]$ , así como los límites del espectro  $BW_i$  de cada canal, que contiene  $M$  muestras.

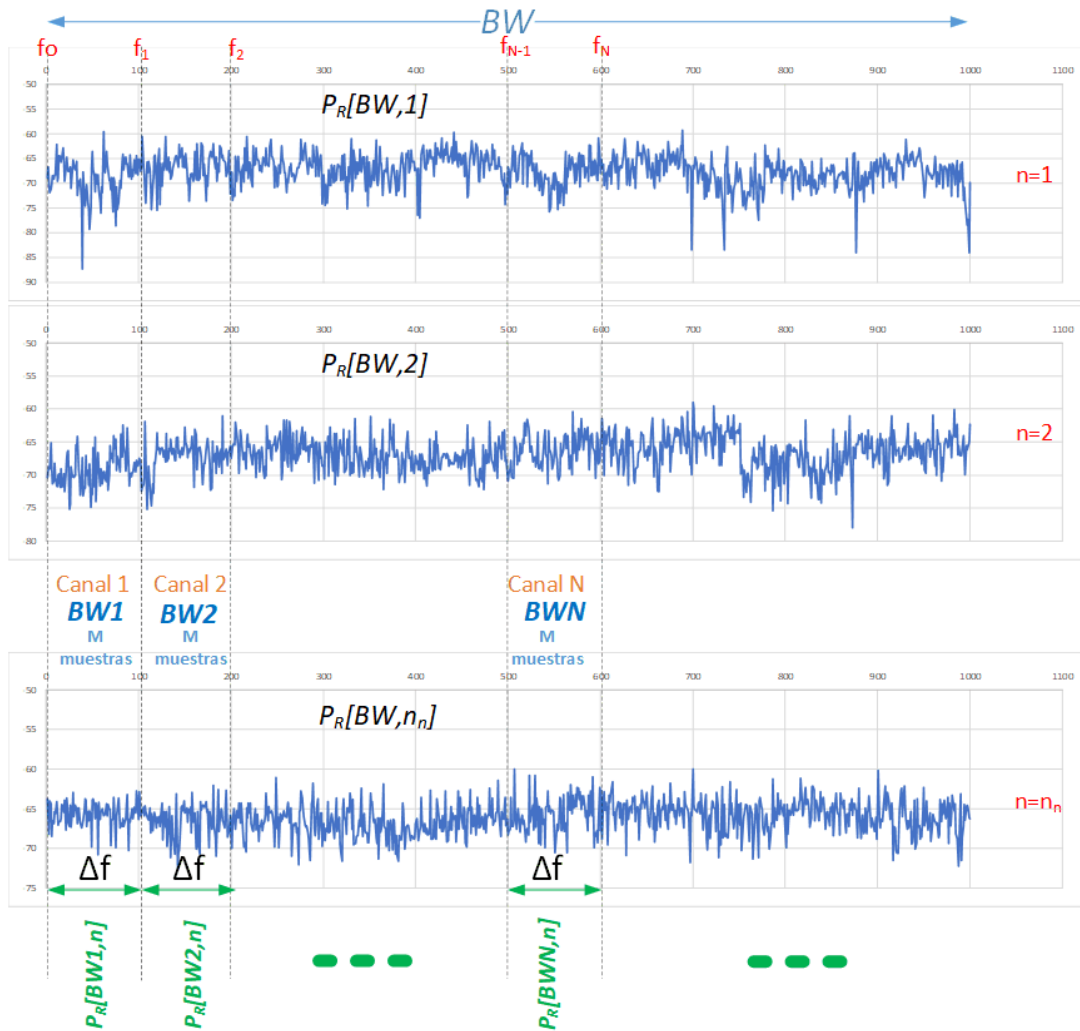


Fig. 3.7 Ejemplo de realizaciones de las mediciones del espectro y su división en canales.

En la Fig. 3.7 puede verse que todos los  $BW_i$  tienen el mismo ancho de banda, que para el caso de los canales de TV es  $\Delta f = 6 \text{ MHz}$ , pero sus límites cambian de acuerdo con la siguiente expresión:

$$BW_i = f_i - f_{i-1}; \quad \forall i = 1, 2, \dots, N, \dots, N_C \quad (3.12)$$

donde  $N_C$  es el número de canales en la banda  $BW$ , considerando a  $f_0$  como la frecuencia inicial del segmento.

A continuación, se le debe asignar un solo valor de potencia a cada canal por cada realización del espectro, para, posteriormente, poder determinar su disponibilidad al compararlo con la referencia; para lograrlo, se consideró asignarle el valor promedio de las  $M$  muestras que contiene cada canal.

Ya que hay  $M$  muestras en el segmento  $BW_i$ , se tiene que cada una de ellas mantiene una separación de  $\frac{(f_i - f_{i-1})}{M-1}$  [Hz] con la muestra vecina, por lo que cada muestra estará ubicada en la frecuencia:

$$f_{i-1} + \frac{k-1}{M-1}(f_i - f_{i-1}), \quad k = 1, \dots, M \quad (3.13)$$

Entonces, el valor promedio de potencia que se le asigna a un canal, en cada realización, está dado por:

$$P_{R(CHi)}[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M P_R [f_{i-1} + \frac{k-1}{M-1}(f_i - f_{i-1}), n] \quad (3.14)$$

Debido a que las mediciones dentro del edificio se las realiza en la ubicación del SS, se procede a renombrar, de acuerdo con (9), a las potencias recibidas de la siguiente manera:

$$P_{BS-SS}[n] = I_{BS-SS}[n] = P_{R(CHi)}[n] \quad (3.15)$$

Desde un punto de vista matricial,  $I_{BS-SS}[n]$  es un vector fila de dimensión  $1 \times N_C$  que contiene una realización de las potencias recibidas, desde cada una de las BS que opera en el ancho de banda  $BW$ ; en cambio, la matriz  $\mathbf{I}_{BS-SS}$  es un arreglo de dimensiones  $n \times N_C$  donde cada elemento  $i_{BS-SS}(l, k)$  contiene el nivel de potencia del canal  $k$  en la realización  $l$ .

Se define ahora la matriz disponibilidad  $\mathbf{D}_{BS-SS}$  que es un arreglo de dimensiones  $n \times N_C$  cuyos elementos  $d_{BS-SS}(l, k)$  contienen un valor binario que informan de la disponibilidad de un canal  $k$  en la realización  $l$ , el mismo que se determina de la siguiente manera:

$$d_{BS-SS}(l, k) = \begin{cases} 1, & \text{si } i_{BS-SS}(l, k) < P_{TH} \\ 0, & \text{si } i_{BS-SS}(l, k) \geq P_{TH} \end{cases} \quad \forall l = 1, \dots, n \quad \forall k = 1, \dots, N_C \quad (3.16)$$

Por otro lado, si la cantidad  $n$  de realizaciones es muy grande, se puede aplicar granularidad en los datos para representar la disponibilidad usando mapas de calor, porque tal como se manifestó anteriormente, este proceso de mediciones es ergódico. Para aplicar granularidad de tamaño  $N_s$ , se debe encontrar una nueva matriz de disponibilidad con granularidad  $\mathbf{D}_{gBS-SS}$ , cuyos elementos  $d_{gBS-SS}(i, k)$  se determinan encontrando un promedio cada  $N_s$  realizaciones del canal  $k$  a partir de los elementos de la matriz  $\mathbf{D}_{BS-SS}$ , de la siguiente manera:

$$d_{gBS-SS}(i, k) = \frac{\sum_{l=(i-1)N_s+1}^{iN_s} d_{BS-SS}(l, k)}{N_s}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, \frac{n}{N_s} \quad (3.17)$$

Es importante notar que los vectores columna, ya sean de la matriz  $\mathbf{D}_{BS-SS}$  o de la matriz  $\mathbf{D}_{gBS-SS}$  representan las  $n$  ó  $\frac{n}{N_s}$  realizaciones de cada canal, respectivamente.

En este capítulo también se tratará de probar los resultados de [79] que indican que la disponibilidad espectral podría comportarse según una distribución Beta, cuya función densidad de probabilidad (PDF) se describe de la siguiente manera:

$$f_x(x) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (3.18)$$

donde:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt \quad (3.19)$$

La media y la varianza de la PDF Beta se determinan de acuerdo con:

$$\mu_{Beta} = \frac{\alpha}{\alpha+\beta} \quad (3.20)$$

$$\sigma_{Beta}^2 = \frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)^2(\alpha+\beta+1)} \quad (3.21)$$

Por otra parte, los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  pueden ser estimados a partir de la media y varianza encontradas en la disponibilidad de cada canal, tal como se muestra a continuación:

$$\alpha = \frac{\mu_{canal}(\mu_{canal} - \mu_{canal}^2 - \sigma^2)}{\sigma^2} \quad (3.22)$$

$$\beta = \frac{(1 - \mu_{canal})(\mu_{canal} - \mu_{canal}^2 - \sigma^2)}{\sigma^2} \quad (3.23)$$

### 3.5.2. DISPONIBILIDAD DE CANALES CONTIGUOS

Hasta el momento, se ha modelado la disponibilidad individual de cada canal, lo que presupone que los SS dispondrán, para operar en forma cognitiva, de un canal de TV, que tiene un ancho de banda de 6 MHz; sin embargo, se quiere determinar la probabilidad de hallar grupos de  $q$  canales contiguos disponibles al mismo tiempo, es decir canales con ancho de banda  $6q$  MHz; los cuales servirían para soportar transmisiones que requieran un gran ancho de banda.

Entonces, se define la matriz de disponibilidad conjunta  $\mathbf{D}_{qBS-SS}$  que es un arreglo de dimensiones  $(n-1) \times N_C$  cuyos elementos  $d_{qBS-SS}(l, k)$  contienen

un valor que informan sobre la cantidad de veces que se encuentra disponibilidad conjunta de  $q$  canales, en cada realización  $l$ . En esta matriz de disponibilidad conjunta, el primer vector columna representa la cantidad de veces que se encuentran grupos de 2 canales contiguos; en la misma forma, el segundo vector columna representará la cantidad de veces que se encuentran grupos de 3 canales, y así sucesivamente, tal como se expresa a continuación:

$$\mathbf{D}_{qBS-SS} = \begin{bmatrix} \sum d_{BS-SS}(1,1) \wedge d_{BS-SS}(1,2) & \sum \dots \dots & \sum d_{BS-SS}(1,1) \wedge \dots \wedge \dots \wedge d_{BS-SS}(1, Ns) \\ \sum \dots \dots & \sum \dots \dots & \sum \dots \dots \\ \sum d_{BS-SS}(l, 1) \wedge d_{BS-SS}(l, 2) & \sum \dots \dots & \sum d_{BS-SS}(l, 1) \wedge \dots \wedge \dots \wedge d_{BS-SS}(l, Ns) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

### 3.5.3. CAPACIDAD DE LOS CANALES DISPONIBLES

Una vez establecida la disponibilidad de los canales, se determina la máxima capacidad disponible usando la totalidad de canales libres, de acuerdo con el teorema de Hartley-Shannon, que se expresa [77]:

$$C = (\sum_i B_i) \log_2 \left( 1 + \left( \frac{S}{P_{Noise}} \right)_i \right) \quad (3.25)$$

donde  $\sum_i B_i$  es el máximo ancho de banda obtenido sumando los anchos de banda  $BW_i$  de todos los canales disponibles en la matriz  $\mathbf{D}_{BS-SS}$ ,  $S$  es el promedio en vatios de los niveles potencia de los mismos canales disponibles, y  $P_{Noise}$  es el promedio del nivel del ruido en toda la banda, también en vatios.

Por otro lado, usando la disponibilidad de  $q$  canales contiguos de la matriz  $\mathbf{D}_{qBS-SS}$ , y el teorema de Hartley-Shannon también se determina la capacidad de  $q$  canales contiguos de acuerdo con la expresión [77]:

$$C_q = (\sum_q B_q) \log_2 \left( 1 + \left( \frac{S_q}{P_{Noise}} \right)_q \right) \quad (3.26)$$

siendo  $(\sum_q B_q)$  el ancho de banda formado por  $q$  canales contiguos,  $S_q$  es la potencia promedio de los  $q$  canales contiguos, y  $P_{Noise}$  es el promedio del nivel del ruido en los  $q$  canales contiguos medido en vatios.

### 3.6. MEDICIONES Y RESULTADOS

A continuación, serán analizados dos casos de mediciones realizadas en edificios ubicados en la zona urbana de la ciudad de Guayaquil, Ecuador.

#### 3.6.1. CASO 1: BAJA DISPONIBILIDAD TEMPORAL

Se realizaron mediciones del nivel de potencia en banda de TV, durante 10 días, en los pisos 1, 9 y 16 de un edificio de 16 pisos ubicado en las coordenadas  $(2^\circ 9' 49.45'' S, 79^\circ 53' 50.92'' O)$  tal como se muestra en la Fig. 3.8, donde se observan las distancias a los sitios donde se encuentran la mayoría de las BS en la ciudad de Guayaquil.

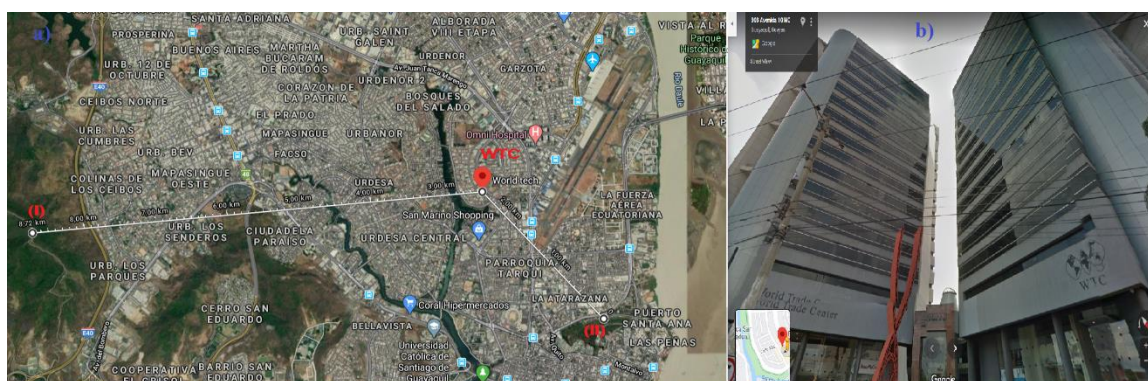


Fig. 3.8 a) Ubicación del edificio WTC y b) imagen del edificio del caso 1.

En esta Fig. 3.8a) se puede observar la ubicación del edificio WTC en la ciudad, mostrando que se encuentra aproximadamente a 2,5 Km del Cerro El Carmen, y a unos 6 Km de Cerro Azul, lugares donde típicamente se ubican las

BS de las estaciones de TV; mientras, en la Fig. 3.8b) se muestra una vista del edificio WTC, de acuerdo con Google Maps. Las mediciones se realizaron de acuerdo con los parámetros mostrados en la Tabla 3-2.

*Tabla 3-2. PARÁMETROS USADOS EN LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN, CASO I*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>DEFINICIÓN</b>	<b>VALOR</b>
$\Delta f$	Ancho de Banda del canal	6 MHz
$f_0$	Frecuencia inicial	512 MHz
$N_c$	Número de canales	30
$P_{TH}$	Potencia de umbral	-75 dBm
$T_c$	Tiempo de muestreo por canal	0.24 s
$T_s$	Tiempo de muestreo total	7.2 s
$M$	Muestras por canal	1000
$BW$	Ancho de banda del espectro de TV	180 MHz

Las mediciones en este edificio arrojaron resultados de poca disponibilidad temporal y gran cantidad de disponibilidad espacial o fija. En la Fig. 3.9 se muestra en mapa de calor las potencias recibidas en un departamento del edificio ubicado en el piso 16, que es el último del edificio. En esta figura se aprecian dos grandes grupos de canales, un grupo de los 9 primeros canales en estudio, entre el canal 21 y el canal 40, que muestran colores entre celeste y amarillo que, de acuerdo con la escala mostrada, son valores entre -60 dBm y -30 dBm, lo que a simple vista permite deducir que son canales ocupados; mientras, el otro grupo de 7 canales se presenta con colores azules que, de acuerdo con la escala, son valores alrededor de -80 dBm, lo que implica que estarían disponibles. También se aprecian canales con variaciones en los colores, lo cual podría ser disponibilidad temporal; pero, se debe hacer uso de (16) para encontrar la disponibilidad.

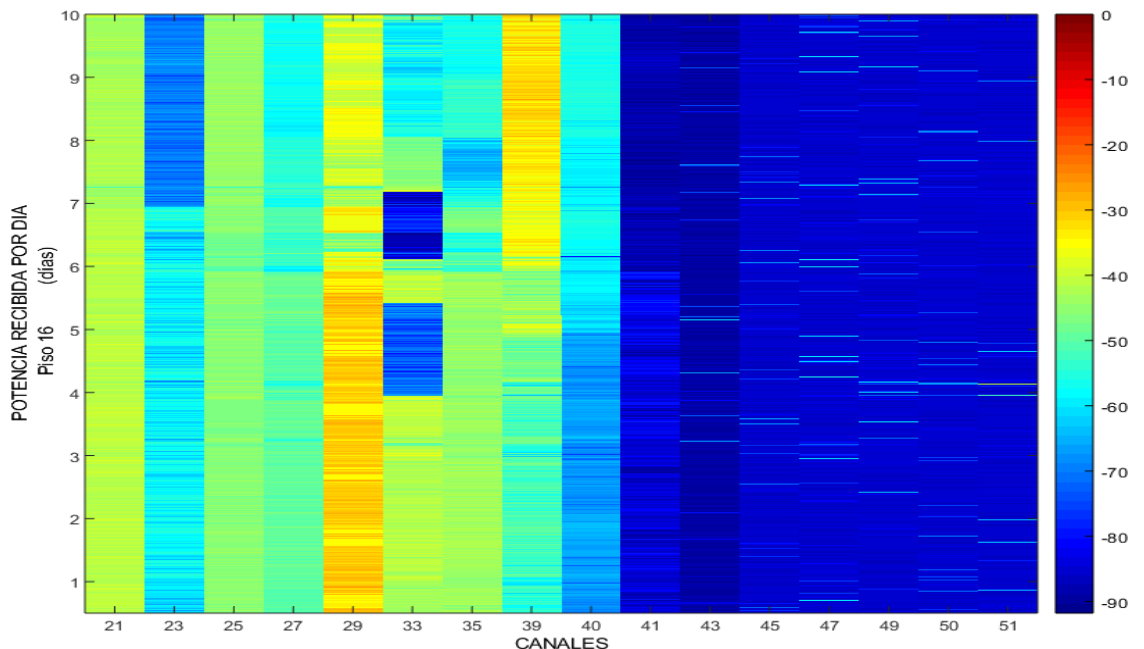


Fig. 3.9 Mapa de calor de las potencias recibidas en el piso 16.

El comportamiento de las potencias recibidas en el piso 9 es muy similar al anterior, pero mostrando un poco más de variabilidad, tal como se muestra en la



Fig. 3.10, donde se puede ver que canales como el 23 y 40 han bajado de niveles de potencia. De igual forma, en la Fig. 3.11 se muestran los niveles de potencia recibidos en el primer piso del edificio, donde se aprecia que el primer grupo de canales ha disminuido su valor de potencia, pero sin llegar al valor de la referencia.

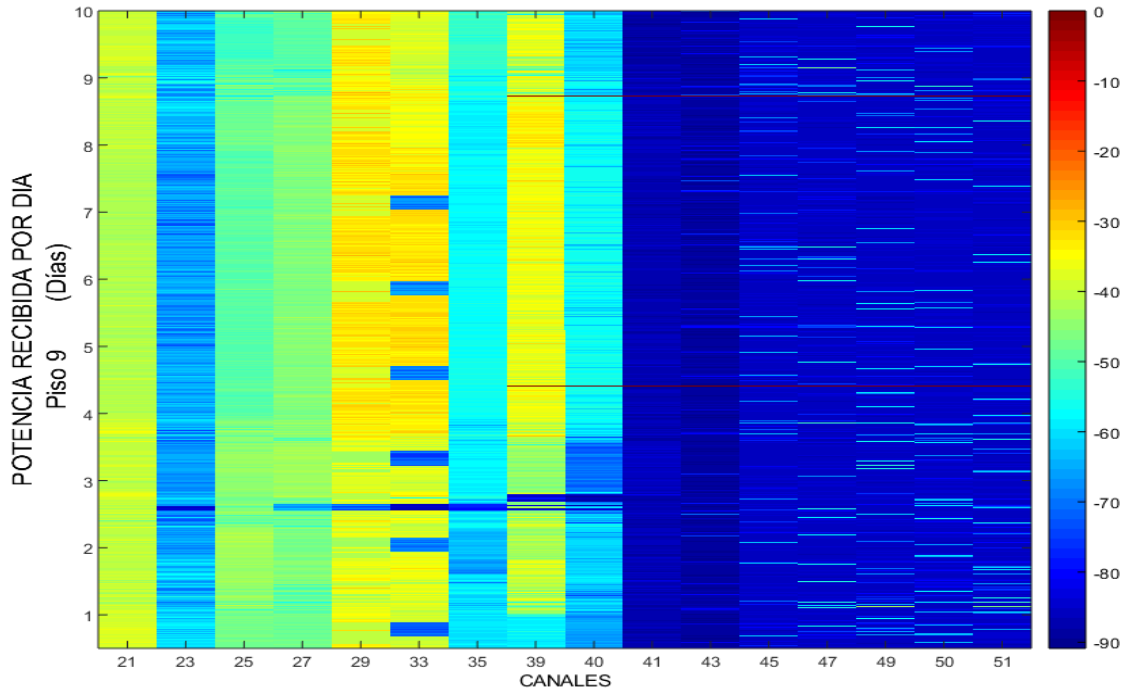


Fig. 3.10 Mapa de calor de las potencias recibidas en el piso 9

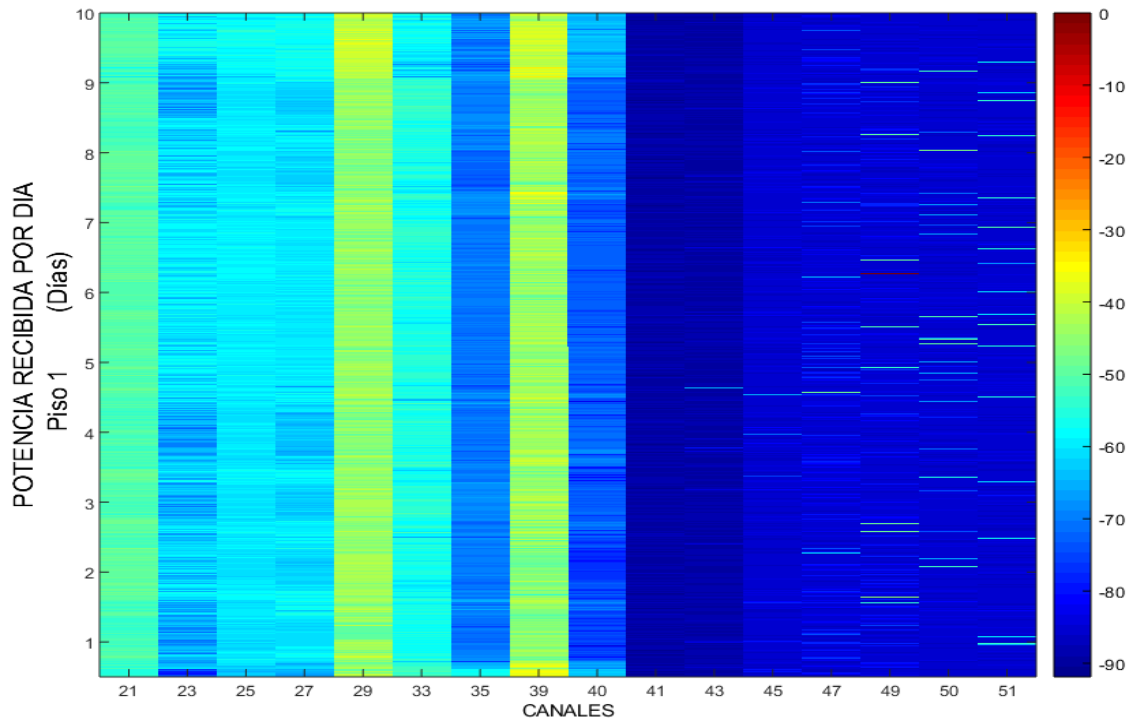


Fig. 3.11 Mapa de calor de las potencias recibidas en el piso 1.

Se encuentra ahora la disponibilidad de canales en cada uno de los 3 pisos, recordando que, por ser un edificio de 16, de acuerdo con lo expresado en la Tabla 3-1, la disponibilidad de los pisos 1 y 9 es considerada disponibilidad efectiva, que es lo mismo decir que allí pueden operar los SS en base cognitiva.

En la Fig. 3.12 se aprecia la disponibilidad de los canales en el piso 16; en este caso, la escala muestra valores entre 0 y 1, recordando que cuando el estado del canal es 1, el canal está disponible y cuando el estado del canal es 0, se considera ocupado.

Tal como se esperaba, cuando se analizaron los niveles de potencia, se han formado dos grupos, uno que está prácticamente no disponible, con pequeñas variaciones de disponibilidad, hasta el canal 40; y el otro grupo que está disponible casi al 100% con poquísimos estados de ocupación. En el canal 33 se muestra un comportamiento atípico no estacionario, estos datos serán considerados aberrantes debidos a inconvenientes en el proceso de toma de

datos, por lo que no forman parte de este análisis. Un vistazo rápido de estos resultados indicaría que los canales 41 al 51 serían considerados de disponibilidad fija o espacial, por lo que se esperaría que en los pisos inferiores se mantenga esta tendencia.

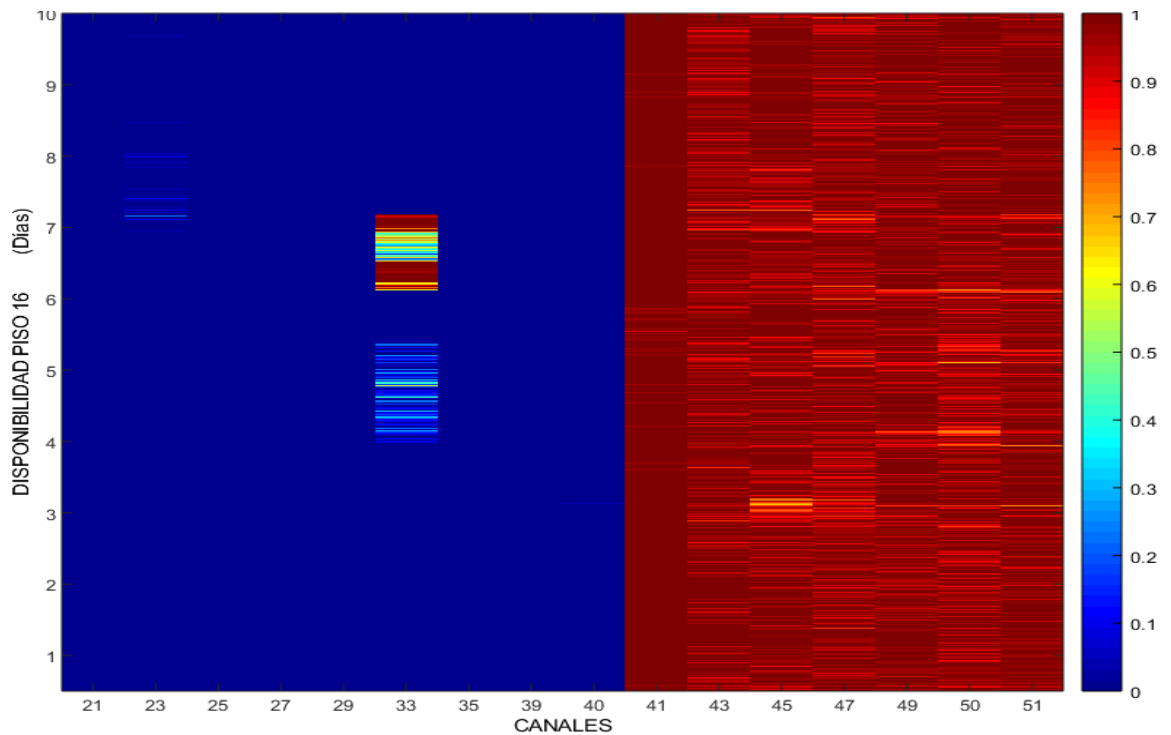


Fig. 3.12 Mapa de calor de la disponibilidad de canales en el piso 16.

Las Fig. 3.13 y Fig. 3.14 muestran la disponibilidad de los canales en los pisos 9 y 1, respectivamente. En estas últimas figuras, se corrobora lo esperado, pues en el piso 1 ya se encuentran definidos claramente el grupo de canales disponibles, aunque no en su totalidad; de acuerdo con la Fig. 3.14, el canal 40 muestra disponibilidades temporales de hasta el 60%, pero en muy pocas ocasiones. Así mismo, los canales 41, 43 y 45 se muestran totalmente disponibles, mientras que los canales mostrados entre los canales 45 y 51, presentan una disminución de alrededor del 20% de su disponibilidad.

Para determinar los valores exactos de disponibilidad encontrada, se realizan los gráficos de los CDF de la disponibilidad de canales en cada piso, los mismos que se muestran en la Fig. 16, corroborando el análisis anterior. El comportamiento de la disponibilidad es muy semejante en los tres pisos, y es debido a que llegan dos tipos de canales, unos con muy alta intensidad, que a pesar de que disminuyen su valor a medida que se desciende, no llegan al nivel de la sensibilidad del receptor, manteniéndose siempre ocupados; y el otro tipo de canal llegan con intensidades muy bajas, estando disponibles ya en los pisos altos y, por consiguiente, también lo estarán en los pisos bajos con mayor razón.

En la misma Fig. 3.15, se puede apreciar que se pueden encontrar hasta 7 canales disponibles con una probabilidad de 0.9 en los pisos 1 y 16, mientras que la probabilidad es 0.97 en el piso 9.

Entonces, en este edificio, la disponibilidad temporal es muy baja y la disponibilidad espacial o fija se mantiene constante en todo el edificio, de acuerdo con lo esperado; sin embargo, se realizará un análisis a tres canales, que visualmente muestran algo de temporalidad en su disponibilidad, y que son los canales 23, 40 y 45.

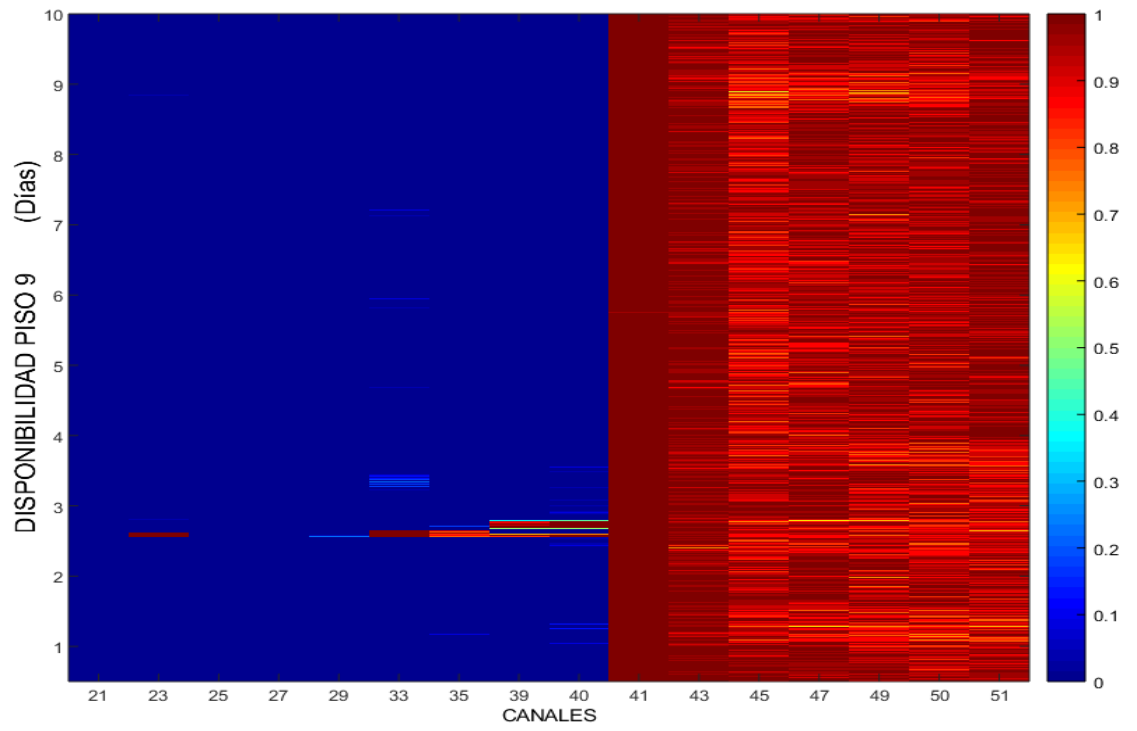


Fig. 3.13 Mapa de calor de la disponibilidad de canales en el piso 9.

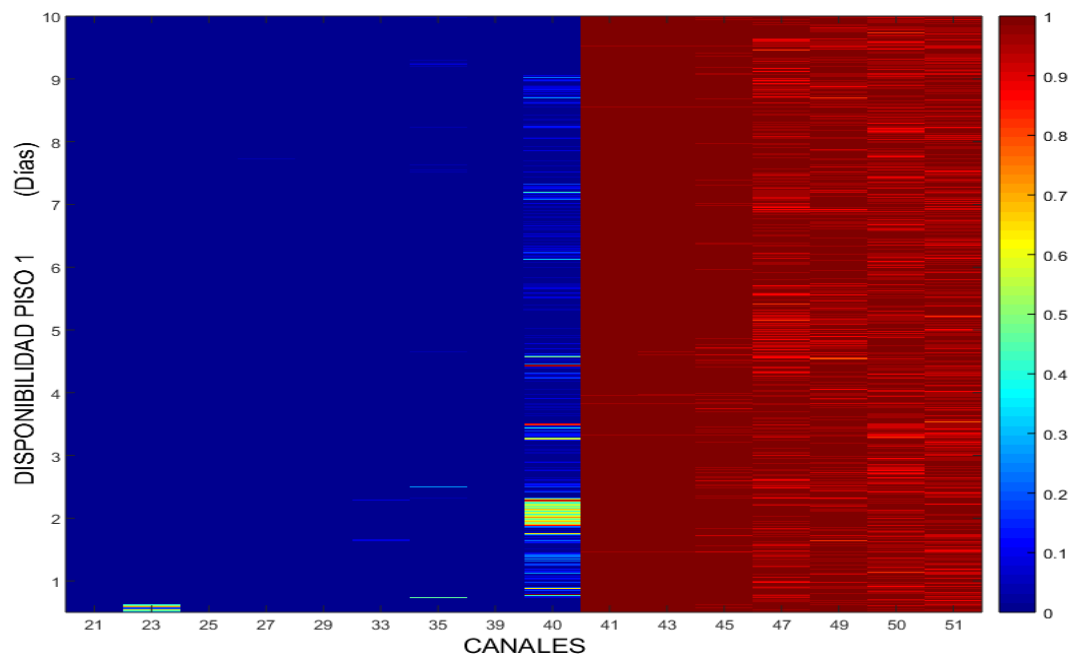


Fig. 3.14 Mapa de calor de la disponibilidad de canales en el piso 1.

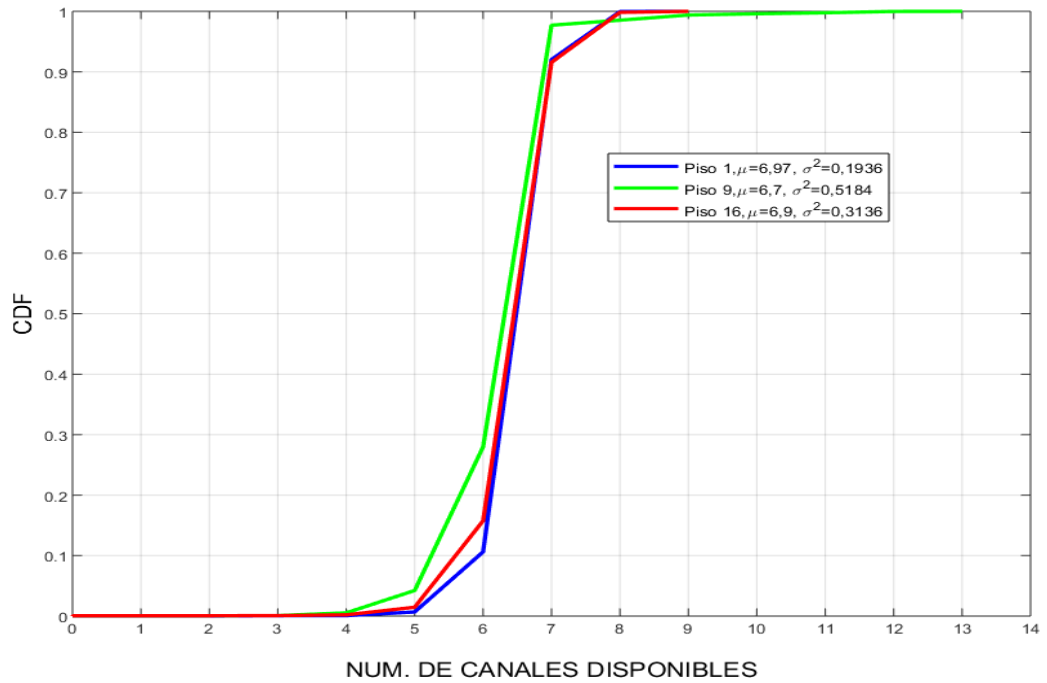


Fig. 3.15 Diagrama del CDF de los canales disponibles en los 3 pisos del estudio.

A estos canales se les construirá su CDF de disponibilidad en cada piso, modelándolos al mismo tiempo empíricamente con la distribución Beta, cuyos parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  se determinan a partir de la media y varianza muestrales, con las ecuaciones (22) y (23).

La Fig. 3.16 muestra el CDF de la disponibilidad de los canales arriba mencionados en el piso 16; obviamente, la gráfica no muestra el comportamiento de una CDF normal pues estos canales en el piso 16 tienen una tendencia muy marcada, los canales 23 y 40 apenas muestran una disponibilidad de hasta el 10%, con una probabilidad mayor al 0.98. Por otro lado, el canal 45 tiene un comportamiento sesgado a estar disponible, con pocas fluctuaciones de ocupación, mostrando que la ocupación de este canal es alrededor del 10% con una probabilidad del 90%. Es interesante notar, en la misma Fig. 3.16, que el modelado con la distribución Beta es bastante aceptable. A continuación, se muestran los CDF de los mismos canales anteriores en los pisos 9 y 1 en las Fig. 3.17 y Fig. 3.18, respectivamente.

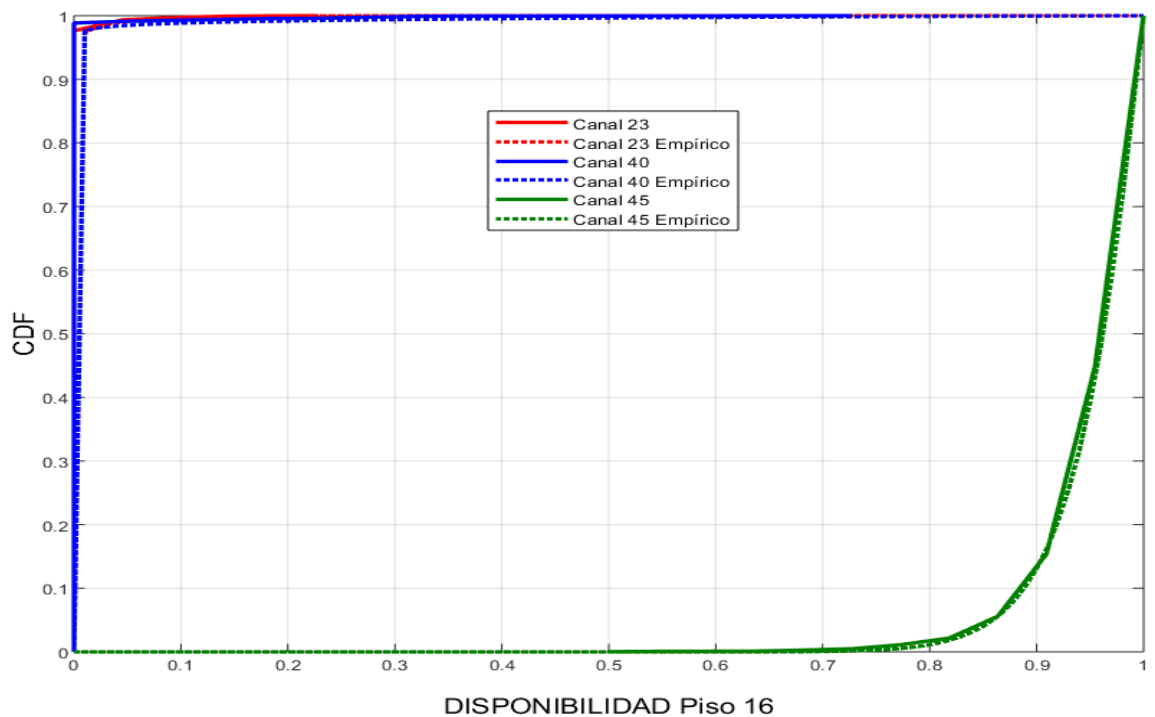


Fig. 3.16 Diagrama de los CDF de los canales 23,40 y 45 en el piso 16.

La Fig. 3.17 muestra que el comportamiento de los canales 2 y 40 se mantiene, en el piso 9, igual que en el piso 16, pero el canal 45 muestra una mayor variabilidad, llegando a tener hasta el 10% de ocupación con probabilidad 0.5, valor que es mayor respecto al piso 16; así mismo, el modelamiento con la función densidad Beta sigue siendo aceptable.

En el piso 1, Fig. 3.18, los canales 23 y 40 presentan muy poca disponibilidad, el canal 23 tiene una probabilidad de 0.95 de tener hasta el 10% de disponibilidad, mientras que el canal 40 presenta una disponibilidad del 10% con probabilidad 0.86; por otro lado, el canal 40 vuelve a comportarse como en el piso 16. El modelo con la función densidad Beta se ajusta, pero con errores, especialmente con el canal 40, donde se muestran notables diferencias. Resumiendo, estos resultados muestran que sí hay disponibilidad del espectro de TV dentro del edificio, aunque esta disponibilidad presenta muy poca temporalidad, es más bien fija; el espectro disponible en el edificio es hasta 7 canales en promedio, es decir se dispondría de un ancho de banda de hasta 42 MHz con una probabilidad mayor a 0.9.

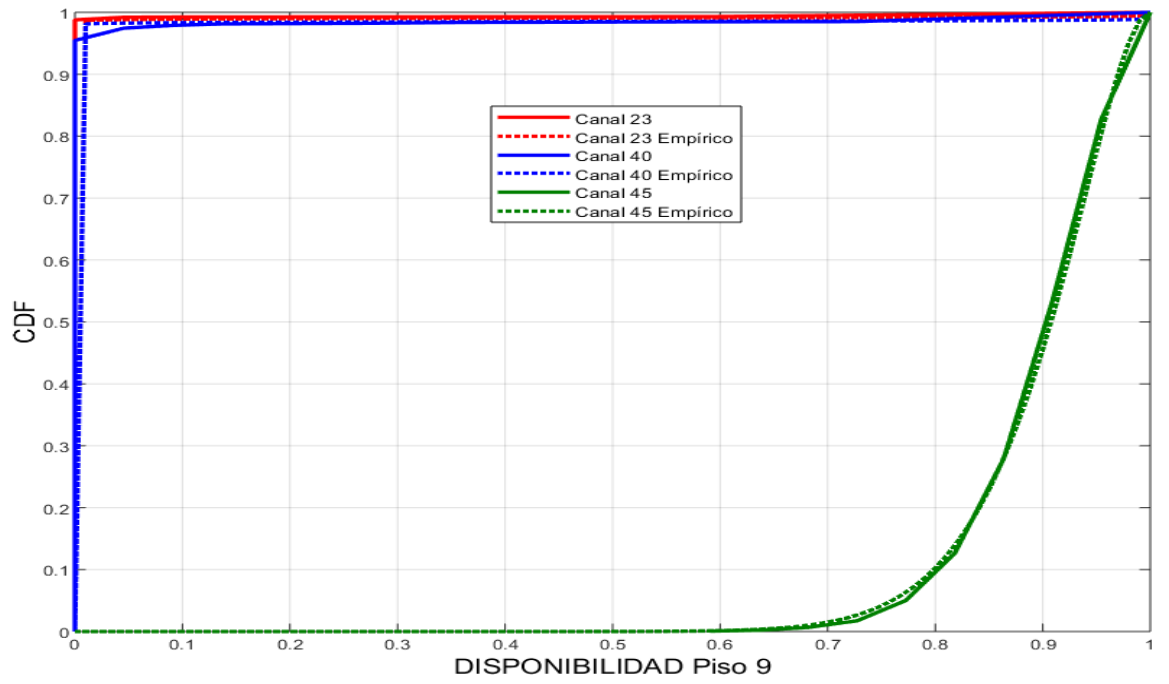


Fig. 3.17 Diagrama de los CDF de los canales 23,40 y 45 en el piso 9.

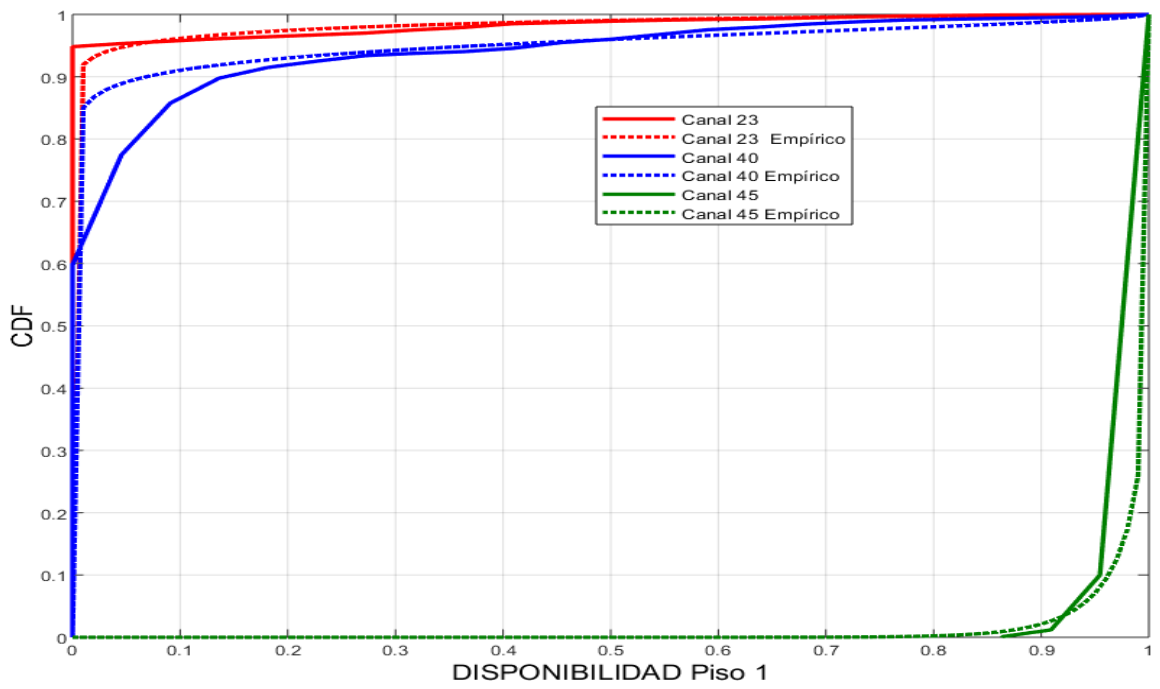


Fig. 3.18 Diagrama de los CDF de los canales 23,40 y 45 en el piso 1.



### 3.6.2. CASO 2: ALTA DISPONIBILIDAD TEMPORAL

Ahora, se mostrará el análisis de los resultados, acerca de la disponibilidad de la banda de TV, que se obtuvieron a partir de una campaña de medición en un edificio de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) ubicado en las coordenadas (2°13'12.94 S, 79°53'12.74 W) durante 7 días consecutivos utilizando el mismo sistema de medición y la misma configuración de parámetros del Caso 1. La diferencia sustancial es que este es un edificio de 5 pisos, por lo que, de acuerdo con lo especificado en la Tabla 3-1, toda la disponibilidad hallada en el piso 1 es disponibilidad efectiva; las mediciones fueron tomadas en el piso 1 y la terraza del piso 5.

En la Fig. 3.19a) se muestra la ubicación del edificio de la UPS, donde además se indica que está alejado alrededor de 4,5 Km del cerro El Carmen, y a unos 10,6 Km del Cerro azul, que son los sitios donde se suelen ubicar la mayoría de las BS de TV; además, en la Fig. 3.19b) se puede apreciar la fachada del edificio UPS, imágenes obtenidas de la aplicación Google Maps.



Fig. 3.19 a) Ubicación del edificio de la UPS con relación a Cerro Azul y Cerro El Carmen; b) Imagen frontal del edificio de la UPS.

Con las mediciones obtenidas en la la terraza del edificio, se construyó el diagrama de calor de la disponibilidad de canales, tal como se muestra en la Fig. 3.20, donde se observan canales con varios tipos de disponibilidad. Al menos hay 2 canales que ya están disponibles, convirtiéndose ellos en disponibilidad fija, y 15 canales que no están disponibles, mientras que, del resto de los canales, la mayoría tienen un comportamiento transitorio elevado.

Por otra parte, los resultados de la disponibilidad de canales en el piso 1 del edificio se muestran en las Fig. 3.21 y Fig. 3.22, variando su granularidad en diversos intervalos de tiempo, para determinar el comportamiento de la disponibilidad a lo largo de la campaña de medición. La Fig. 3.21 muestra la disponibilidad en el piso durante la semana de medición, donde se puede apreciar que la disponibilidad ha aumentado sustancialmente, pues se encuentran 10 canales (10,16,19,20,23,24,26,28,29,30) completamente disponibles, 3 canales (2, 12 y 14) totalmente ocupados, y el resto con disponibilidad temporal.

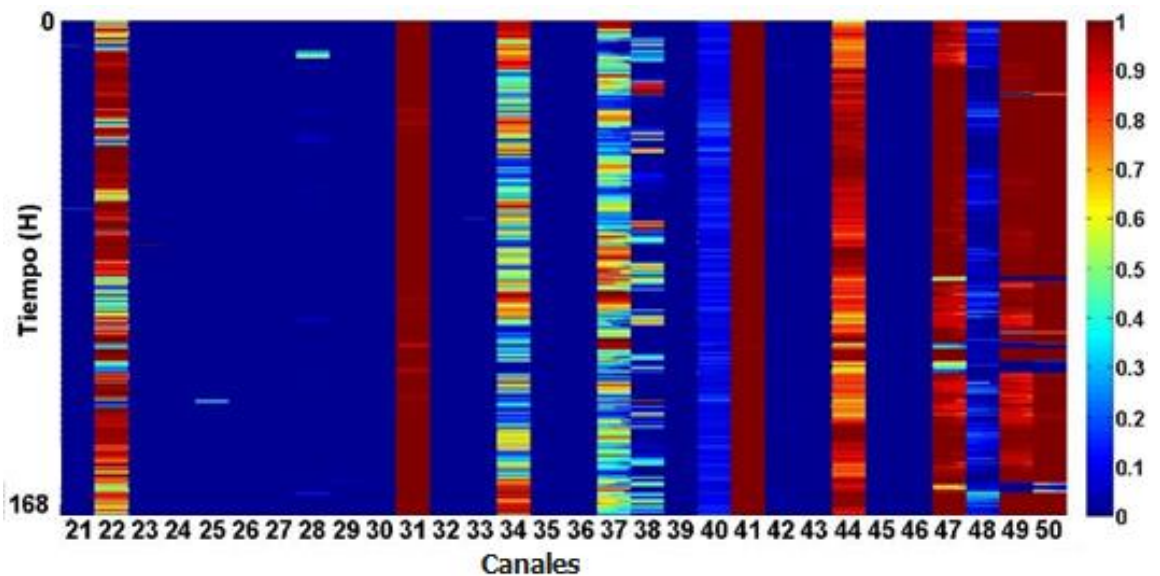


Fig. 3.20 Diagrama de calor de la disponibilidad de canales de TV en la terraza del edificio.

En la Fig. 3.22, se muestra la disponibilidad del piso 1 en la primera hora de la campaña de medición, donde la tendencia del comportamiento en disponibilidad, de los canales completamente disponibles y ocupados, se

mantiene, existiendo diferencias en el comportamiento temporal, lo cual es lógico por ser diferentes las horas de medición.

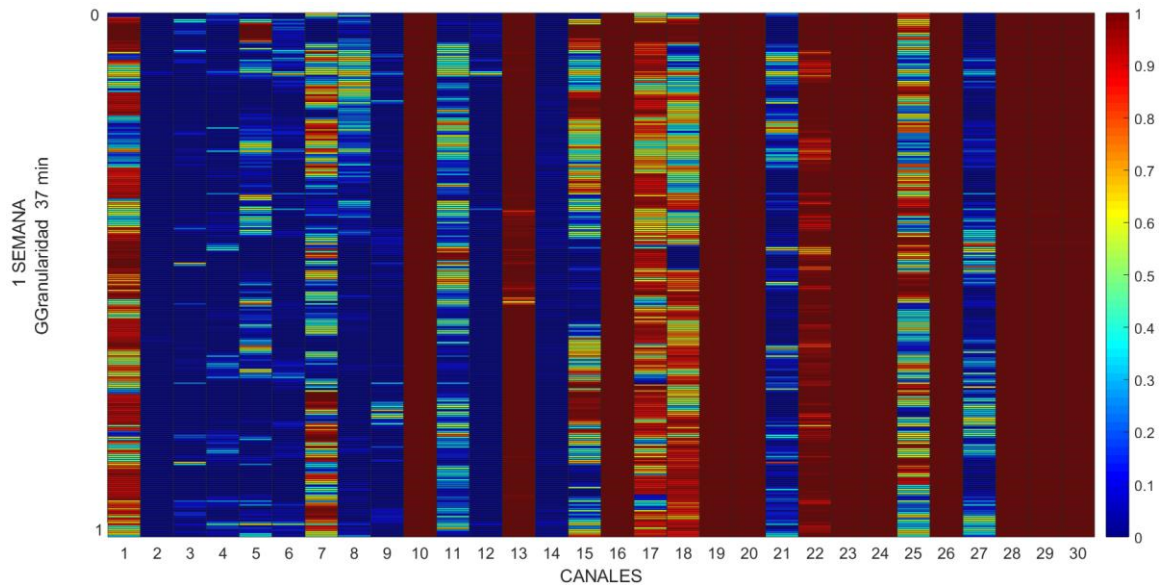


Fig. 3.21 Diagrama de calor de la disponibilidad de canales de TV en el piso 1, con granularidad de 37 min.

Otra manera de distinguir gráficamente el comportamiento de la disponibilidad en la terraza y en el piso 1, es construyendo la CDF de la disponibilidad de canales en dichos pisos, como se muestra en la Fig. 3.23. En esta figura, se distingue claramente la diferencia en disponibilidad, pues mientras con probabilidad de 0.9 se pueden encontrar hasta 9 canales disponibles en la terraza (Piso 5), en el piso 1 se pueden encontrar hasta 18 canales disponibles; así mismo, se puede notar que el número máximo de canales disponibles en el piso 5 es 10, y en el piso 1 es 21, aclarando que esto no quiere decir que estén disponibles todo el tiempo. En este edificio, a diferencia del edificio del caso 1, la disponibilidad temporal es alta y la disponibilidad espacial o fija ha aumentado en el piso 1, de acuerdo con lo esperado; sin embargo, se realizará un análisis a cuatro canales que muestren baja, media y alta temporalidad en su disponibilidad, de acuerdo con lo que muestra la Fig. 3.24; escogiéndose los canales 24, 28, 38 y 43 porque cumplen tales especificaciones.

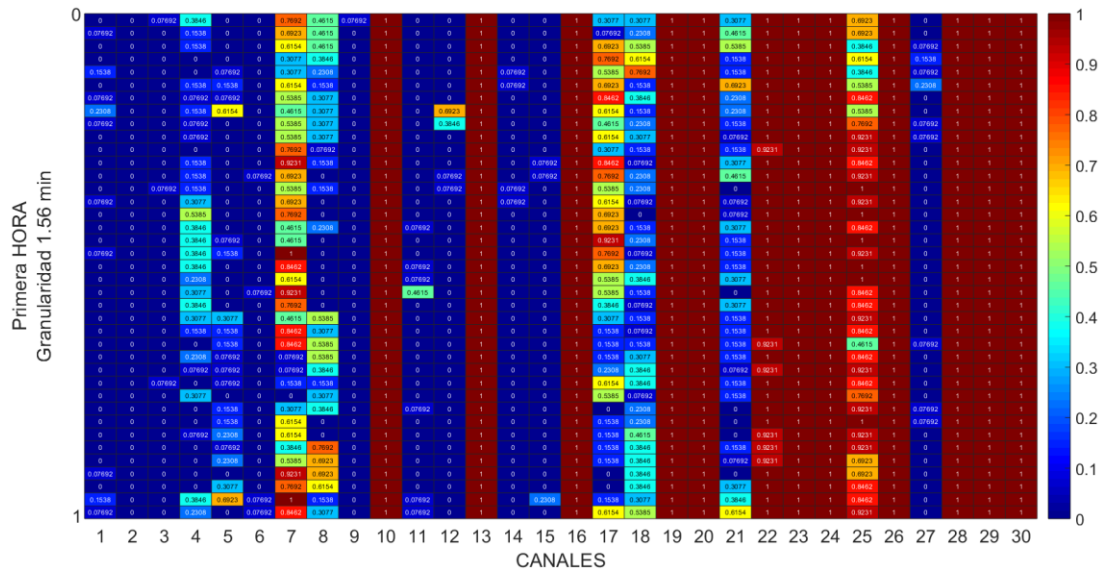


Fig. 3.22 Diagrama de calor de la disponibilidad en el piso 1, durante la primera hora de mediciones, con granularidad de 1.56 min.

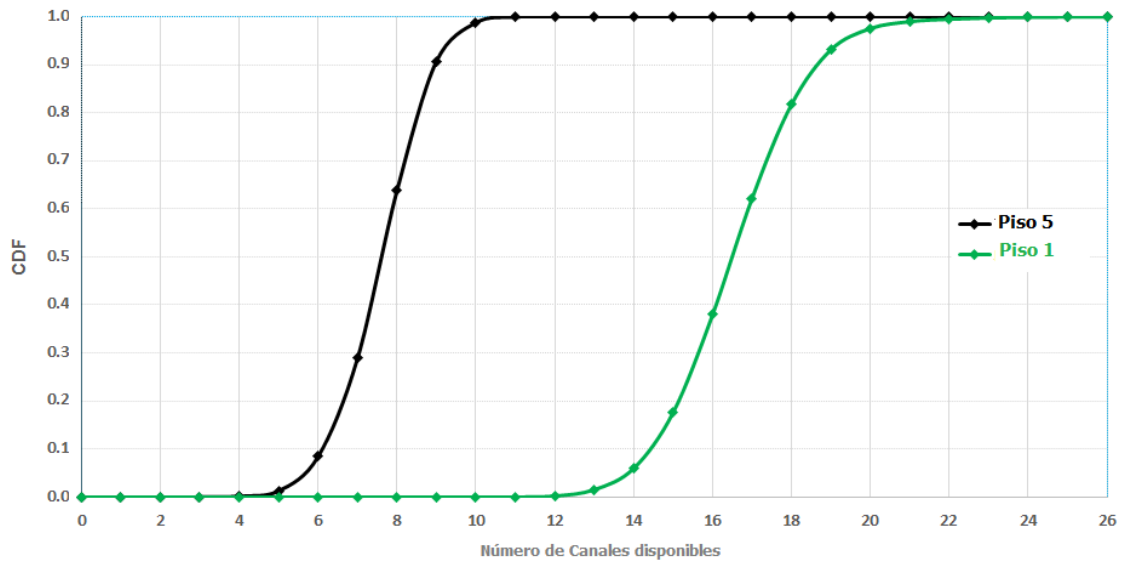


Fig. 3.23 Comparación de los CDFs de la disponibilidad de canales de TV del piso 1 con el en el piso 5.

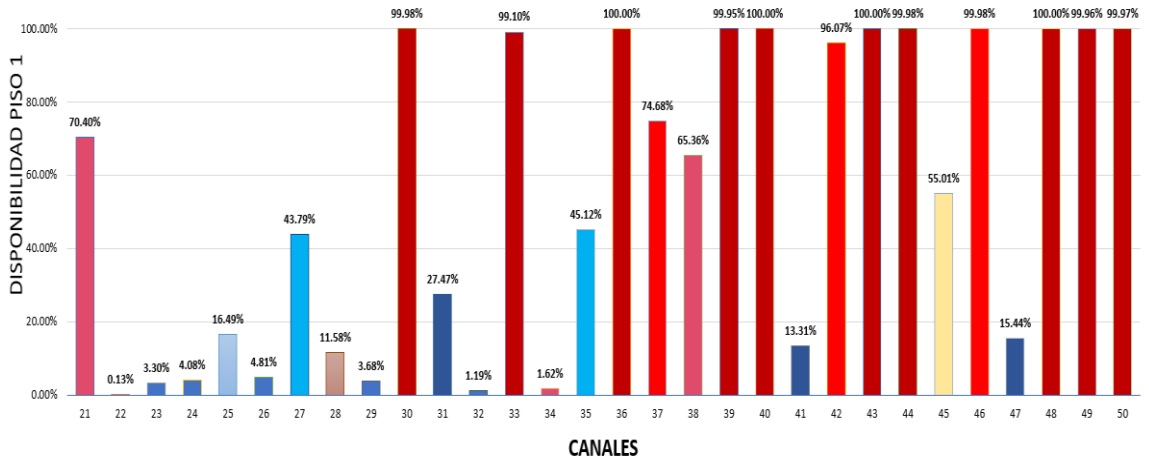


Fig. 3.24 Porcentaje de disponibilidad de la banda de TV en el piso 1.

Los CDF de los canales seleccionados se muestran en la Fig. 3.25, al tiempo que se los compara con la construcción empírica de la distribución Beta, cuyos parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  se determinan a partir de la media y varianza muestrales, tal como se especificó en el Caso 1.

Se ha notado que los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  toman valores de acuerdo con el comportamiento de la disponibilidad del canal; es decir, cuando la disponibilidad se incrementa, el valor del parámetro  $\alpha$  es mayor que 1, dándole así a la CDF el comportamiento de curva convexa, como en los canales 38 ( $\alpha_{38} = 1.16, \beta_{38} = 0.394$ ) y 43 ( $\alpha_{43} = 4.53, \beta_{43} = 0.186$ ); mientras que, para los canales de baja disponibilidad, el valor de  $\alpha$  se aproxima a 0, presentando la CDF una curvatura cóncava tal como sucede en los casos de los canales 24 ( $\alpha_{24} = 0.06, \beta_{24} = 1.056$ ) y 28 ( $\alpha_{28} = 0.33, \beta_{28} = 0.429$ ).

Con el fin de determinar el comportamiento de la disponibilidad en función del nivel de referencia, se realizará un barrido de  $P_{TH}$  entre los valores de -95 dBm y -72 dBm; estos resultados, que se muestran en la Fig. 3.26, serán útiles cuando se pretenda utilizar este espectro con receptores diferentes, donde los receptores tendrían sensibilidades diferentes al nivel de umbral de -75 dBm.

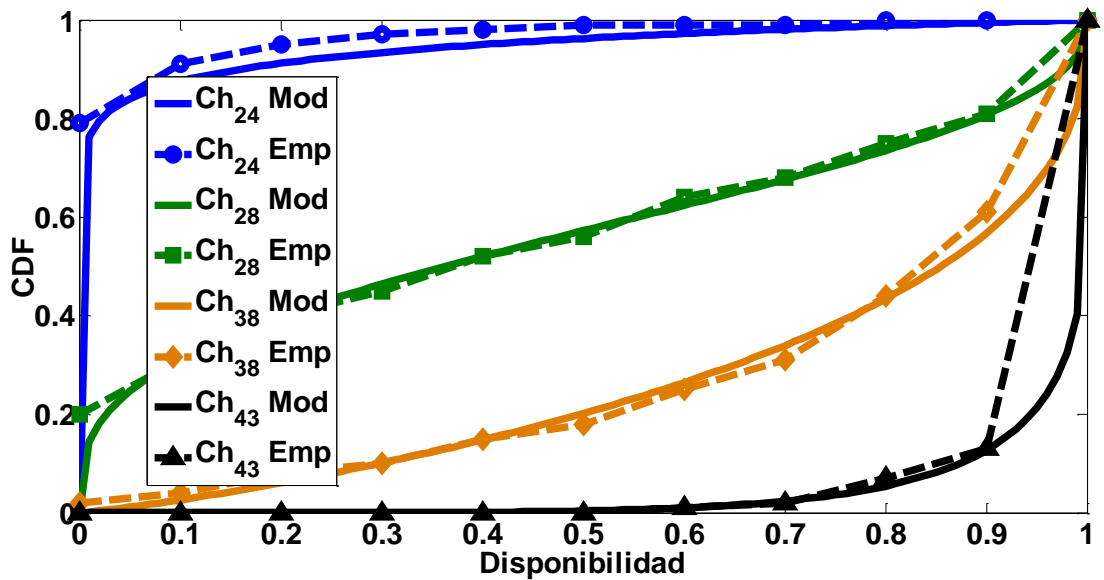


Fig. 3.25 Comparación de los CDF de los canales 24, 28, 34 y 38 con la función densidad Beta.

En la Fig. 3.26 se puede observar el PDF de la disponibilidad en el piso 1 tiene un comportamiento que pasa de una forma más dispersa, en los valores extremos de la referencia, como -94 dBm y -72 dBm, a una forma de menor dispersión, como para cuando  $P_{TH}$  toma valores entre -90 dBm y -82 dBm; esto quiere decir que, para el último caso, los canales disponibles son aproximadamente los mismos, permaneciendo en ese estado un tiempo considerable durante las mediciones. Por ejemplo, en la Fig. 3.26, se muestra que aproximadamente de 10 a 12 canales estarían disponibles el 35% de las veces durante la medición, cuando la referencia está entre -90 dBm y -82 dBm (i.e. líneas rosada, azul y turquesa respectivamente); sin embargo, también indica que si  $P_{TH} = -76$  dBm, se tendrían hasta 16 canales disponibles, pero solo el 25% del tiempo de la medición (línea naranja).



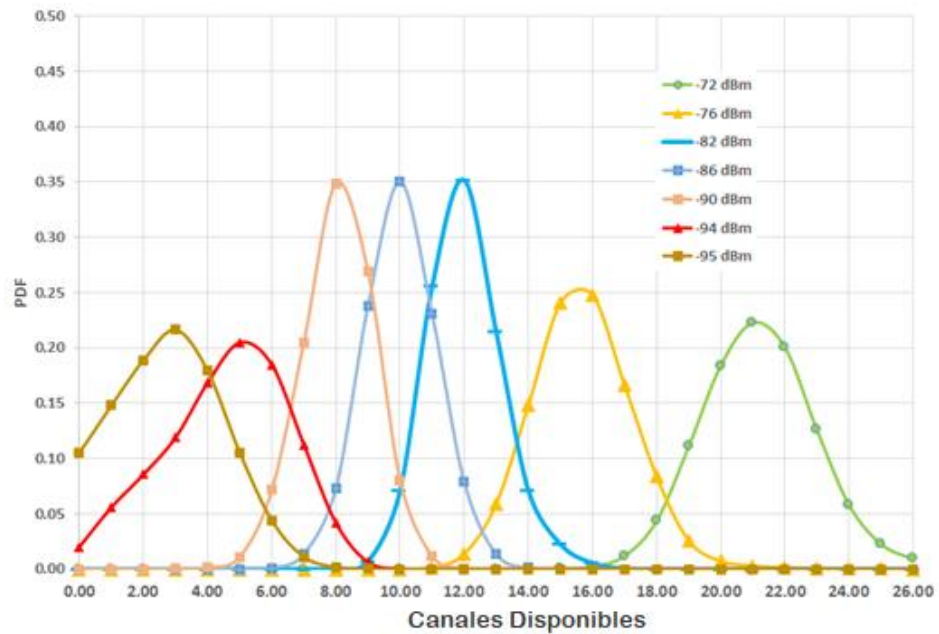


Fig. 3.26 Análisis de sensibilidad del PDF de la disponibilidad del espectro respecto a  $P_{TH}$ .

Más aún, en la Fig. 3.27 se destaca la importancia del valor de la referencia en la variabilidad del número de canales disponibles en el piso 1; pues, a medida que  $P_{TH}$  disminuye de -72 dBm, el número de canales disponibles también disminuye; así, en la misma figura se puede observar que habrá hasta 16 canales disponibles con probabilidad 0.8 si  $P_{TH} = -76$  dBm (línea amarilla), pero solo hasta 12 canales disponibles si  $\lambda = -82$  dBm (línea azul claro)

Ya que se tiene una gran disponibilidad de canales en la planta baja del edificio del Caso 2, habría una gran capacidad disponible para transmisión de datos si se utilizaran SS cognitivos basados en DSA, por lo que, en la Fig. 3.28 se muestra la capacidad total disponible calculada con (25). En esta figura se muestra que se pueden obtener velocidades de hasta 2700 Mbps con una probabilidad de 0.8 si  $P_{TH} = -82$  dBm, hasta 3500 Mbps si  $P_{TH} = -76$  dBm, y hasta 4200 Mbps si  $P_{TH} = -74$  dBm.

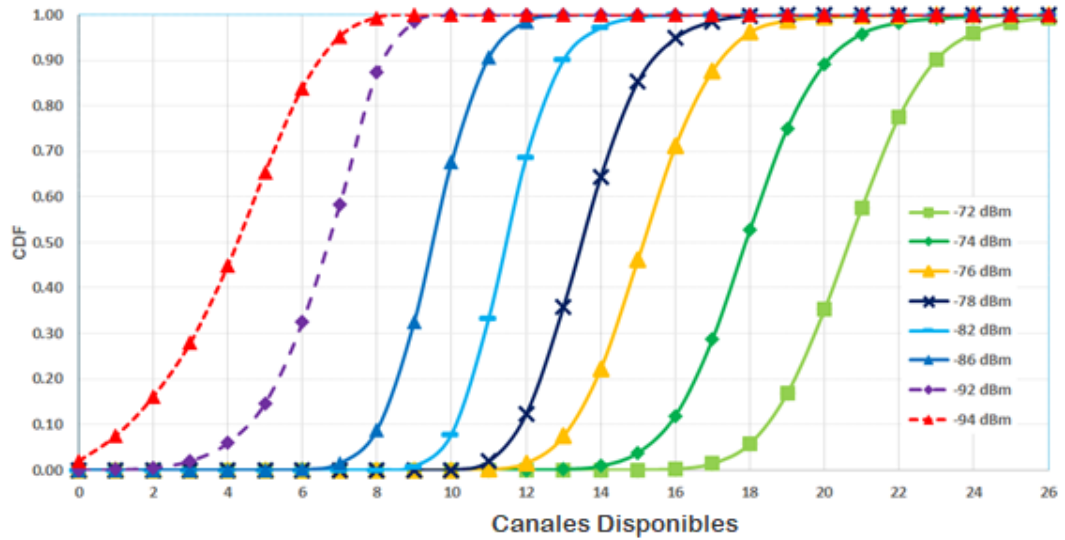


Fig. 3.27 Análisis de sensibilidad del CDF de la disponibilidad del espectro respecto a  $P_{TH}$ .

El potencial de esta capacidad disponible puede apreciarse en la Tabla 3.3, donde, el ancho de banda presentado cuando  $P_{TH} = -75$  dBm se compara con varias tecnologías; en este caso, de acuerdo con la Fig. 3.23, el ancho de banda analizado es 96 MHz lo cual ocurre hasta el 50% de las veces durante la medición.

Las tecnologías comparadas fueron GSM, con un ancho de banda de 200 KHz por portadora [80]; el estándar IEEE 802.11g, que usa 52 subportadoras en máscara de 20 MHz [81]; el estándar IEEE802.11n, con 114 subportadoras en máscara de 40 MHz [81] y LTE que usa en sus estándares 15 KHz por subportadora [82]. En la Tabla 3-3 se muestra que, para el caso del sistema GSM, es posible soportar hasta 480 portadoras, para el estándar IEEE 802.11g se soportaría hasta 268 subportadoras, hasta 273 subportadoras para el estándar IEEE 802.11n, y finalmente, en caso del estándar de LTE se soportaría exactamente hasta 6400 subportadoras con la disponibilidad encontrada en el piso 1.



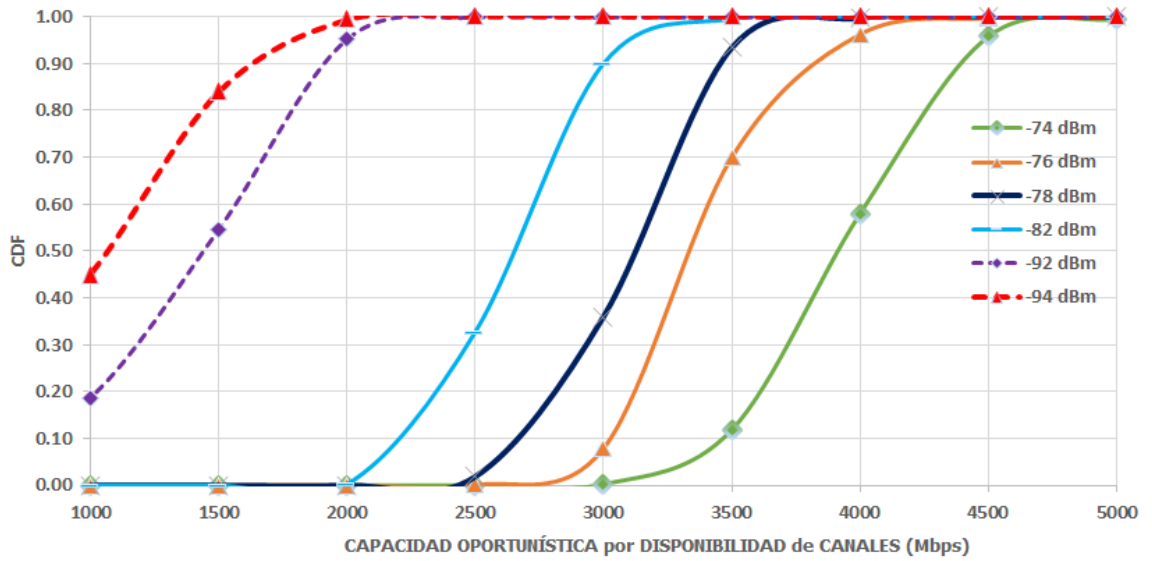


Fig. 3.28 CDF de la capacidad oportunistica disponible en el piso1, respecto a diferentes valores de  $P_{TH}$ .

Tabla 3-3 POTENCIAL ACCESO OPORTUNISTA PARA DISPOSITIVOS COGNITIVOS

SISTEMA	ACCESO POTENCIAL
GSM	480 Portadoras
IEEE 802.11 g	268 Subportadoras
IEEE 802.11 n	273 Subportadoras
LTE	6400 Subportadoras

### 3.6.3. DISPONIBILIDAD DE CANALES CONTIGUOS

Los resultados de la sección anterior demuestran que es posible obtener alta disponibilidad, en el interior de edificios, para el uso por los SS propuestos aquí; sin embargo, dichos cálculos se realizaron en base a una disponibilidad total de canales independientes de 6 MHz de ancho de banda cada uno.

La tecnología actual en sistemas de corto alcance usa canales de mayor ancho de banda, lo que implicaría que los sistemas de corto alcance que van a actuar como SS mantengan el performance, deberían de usar canales de iguales o similares anchos de banda; por lo que, en esta sección, se analiza la posibilidad de encontrar canales conjuntos que puedan brindar más ancho de banda. Por ejemplo, si un SS debe operar dentro del edificio, manteniendo el performance de un sistema Wi-Fi de 20 MHz [81], necesitaría al menos 4 canales de TV contiguos.

La Fig. 3.29 muestra el CDF de la disponibilidad de canales adyacentes encontrados a diferentes niveles de referencia; donde se observa que, cuando  $P_{TH} \leq -80$  dBm, sólo se dispone de grupos de 2 canales contiguos, y para valores de  $P_{TH}$  entre -74 dBm y -80 dBm, se dispone de grupos de hasta 5 canales contiguos, pero con bajas probabilidades; por ejemplo, se podría obtener un ancho de banda exacto de 5 canales de TV contiguos con una probabilidad de 0.373 si la referencia es  $P_{TH} = -74$  dBm, mientras que la probabilidad es de aproximadamente 0.188 si  $P_{TH} = -80$  dBm, la probabilidad continúa disminuyendo a 0.08 si  $P_{TH} = -92$  dBm.

Se puede decir que la ocurrencia de disponibilidad conjunta es baja, aunque en cada realización del espectro pueden encontrarse varios grupos de canales contiguos; por ejemplo, tal como se muestra en la Fig. 3.30, se han descubierto hasta 12 grupos de 12 MHz cuando  $P_{TH} = -74$  dBm con probabilidad 0.8.

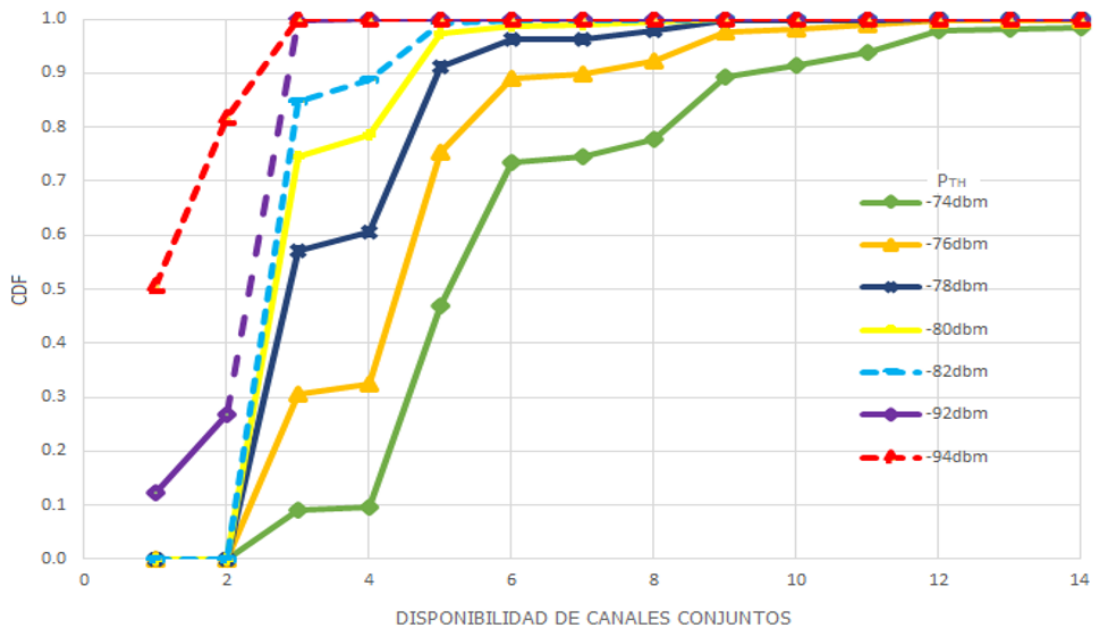


Fig. 3.29 CDF de la disponibilidad de canales conjuntos en el piso1, respecto a  $P_{TH}$ .

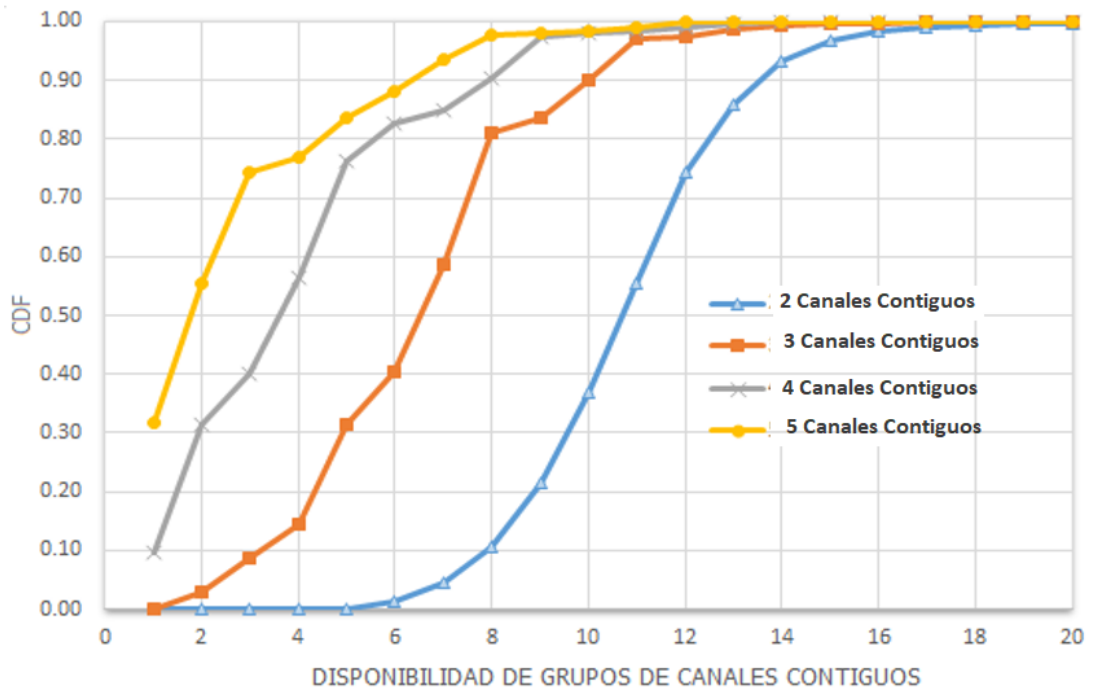


Fig. 3.30 CDF de la disponibilidad de grupos de canales conjuntos en el piso1,  $P_{TH} = -75$  dBm.

### 3.7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se ha logrado desarrollar un modelo para determinar y caracterizar el comportamiento de la disponibilidad de los canales de TV en el interior de edificios ubicados en zonas urbanas densas, usando la ubicación espacial del sitio de medición, para especificar si un canal está efectivamente disponible; siendo una novedad, de este estudio, la definición de disponibilidad efectiva, además de que este enfoque ha permitido validar el hecho de que un canal pueda estar ocupado en los pisos superiores, pero al mismo tiempo estar disponible en los pisos inferiores.

Por otro lado, se ha demostrado el gran potencial de la disponibilidad, de un segmento de espectro, para su uso futuros sistemas DSA basados en CR, pues esta disponibilidad puede ser utilizada por diferentes tecnologías, siendo capaz de servir a una gran cantidad de usuarios secundarios, logrando con esto mejorar la eficiencia en el uso del espectro y contrarrestar los efectos de la escasez de espectro.

Así mismo, se demuestra en este capítulo, que es posible que diferentes tecnologías, con capacidad DSA, puedan operar al interior de un edificio; además, que los sistemas que utilizan portadoras con ancho de banda menores a 6 MHz, como GSM, tienen una gran oportunidad, mientras que los, sistemas que utilizan máscaras de gran ancho de banda en sus portadoras, tal como Wi-Fi o LTE, presentan menos oportunidad como sistemas completos, aunque tienen una gran posibilidad de operación si lo hacen con subportadoras distribuidas en todo el espectro disponible.

Debido a que la disponibilidad es sensible al nivel de referencia, se propone que los nuevos sistemas DSA basados en CR, puedan operar con nivel de referencia adaptativo para lograr mantener la calidad de servicio cuando opere como SS.



---

## **4. MECANISMO DE ESTIMACIÓN ESPACIAL DE ESA EN INTERIORES DE EDIFICIOS**

---

En este capítulo se pretende estimar la ESA en el interior de un SB incorporando un elemento diferenciador: sin usar mediciones locales y, además, tomando en cuenta la posible interferencia causada hacia un despliegue de usuarios de banda primaria al interior del edificio. El mecanismo de estimación de la ESA se basará en el cumplimiento simultáneo de dos condiciones en cada habitáculo del edificio; la primera, debe establecer el uso del espectro incumbente por parte del operador; y la segunda, comprobar si se producen interferencias hacia el despliegue de usuarios licenciados en el interior del edificio.

Con el fin de establecer el cumplimiento de esas dos condiciones en el interior del edificio, será necesario usar modelos de propagación conocidos, aplicados a un escenario urbano denso. Los modelos de propagación a ser usados en este mecanismo serán previamente validados con dos campañas de medición realizadas en el interior de dos edificios ubicados en la zona urbana de la ciudad de Guayaquil, Ecuador. En particular, para este estudio se usará la banda de TV por su disponibilidad y sus características de propagación [35] [36].

### **4.1. INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, los edificios muy grandes son diseñados y construidos integrados totalmente a su entorno, de forma tal que muestren un alto nivel de inteligencia, con el fin de mejorar los servicios brindados a sus usuarios (e.g. salud, administración de energía, confort visual, confort térmico y productividad) [5]. Para que se cumpla esta mejora en los servicios, los usuarios deben estar siempre conectados, por lo que se preferirán las tecnologías de comunicación inalámbricas respecto de las redes cableadas;

y muy especialmente, los sistemas interiores de corto alcance, ya que son de despliegue muy sencillo, presentan flexibilidad, brindan portabilidad, y son escalables [5].

Esta situación implica que, los edificios inteligentes (Smart Building (SB)) ubicados en zonas urbanas de alta densidad dentro de una ciudad inteligente (Smart City(SC)), tendrían operando en su interior una gran cantidad de sistemas de corto alcance brindando servicios móviles a sus usuarios (e.g. Bluetooth, WiFi, femto celdas LTE/GSM, WSN, ZigBee, RFID) [4]; visualizándose así, un alto crecimiento de dispositivos conectados y el incremento de una gran cantidad de tráfico inalámbrico [6]. Este escenario futurista se está desarrollando aceleradamente en forma global; tal es así, que se ha pronosticado para el año 2022 el incremento del tráfico inalámbrico, al igual que las conexiones y dispositivos, en una proporción que se acerca a 11 veces del tráfico móvil generado en el 2017 [6].

Para satisfacer esta creciente demanda de tráfico inalámbrico, podría intuirse que sería necesario asignar nuevos segmentos o bandas espectrales para la provisión de los nuevos servicios [83]; esto, si se mantiene el esquema tradicional de asignación y control del espectro electromagnético, tal como el modelo rígido denominado Comando y Control (CaC) [84]. Sin embargo, con el fin de mejorar la eficiencia en el uso del espectro, miembros de la comunidad científica han propuesto el cambio de modelo en la administración del espectro electromagnético desde uno rígido como CaC, hacia otro modelo dinámico tal como el Acceso Dinámico al Espectro (Dynamic Spectrum Access, (DSA)) [38].

DSA permite usar a cualquier operador un segmento disponible de banda licenciada, en cualquier posición espacial siempre y cuando no se causen interferencias a los usuarios del incumbente; tal como lo hace la Radio Cognitiva (CR), tecnología que implementa DSA para contrarrestar la escasez de espectro [21].

Para la operación de sistemas basados en CR dentro de un SB, será necesario identificar las locaciones interiores que tengan disponibilidad efectiva del espectro (ESA); es decir locaciones donde existan segmentos de frecuencia no utilizados por los sistemas establecidos cuyo uso no causaría interferencia al usuario titular. Los

segmentos espectrales disponibles pueden ser encontrados utilizando variadas técnicas que pueden consolidarse en dos grandes grupos: una de ellas, a través de información brindada en bases de datos especializadas, y la otra, a través de mediciones locales [21].

En el caso de interiores de edificios ubicados en zonas urbanas densas (e.g. el interior de un SB), la información de disponibilidad brindada por las bases de datos debe ser ajustada, pues ya se ha demostrado que la disponibilidad espectral externa de edificios ubicados en zonas urbanas densas es menor que en su interior [27]. Sin embargo, ya sea ajustando la información las de bases de datos, o utilizando mediciones espectrales interiores, la información de disponibilidad espectral solamente indicaría la presencia o ausencia del operador incumbente (e.g. los espacios en blanco de la banda de TV (TVWS) interiores).

Para que la disponibilidad espectral sea reutilizable en el interior de un SB, será necesario tomar en cuenta una condición adicional, la posible interferencia local que podrían producir los sistemas inalámbricos de corto alcance basados en CR (short-range CR wireless system (SR-CRWS)) hacia los usuarios de la red incumbente desplegados al interior del SB [21] [27]. Por esta razón, la determinación de la disponibilidad espectral efectiva (ESA) al interior de un edificio (i.e. SB), se convierte en un reto actual.

Además, conocer la ESA tendría el beneficio de poder planificar la operación de servicios y sistemas inalámbricos en interiores de SB, tales como las redes cognitivas de sensores inalámbricos y las redes domésticas inalámbricas cognitivas, sin necesidad de utilizar nuevas bandas espectrales. Tales sistemas interiores serían de corto alcance basados en CR, que podrían utilizar cualquier tipo de tecnología actual (e.g. Wifi, GSM, LTE, WSN) [38].

Por tales razones, en el presente capítulo se propone un nuevo mecanismo que permita estimar, sin mediciones de niveles de potencia, la mínima cantidad de ESA en bandas licenciadas, al interior de los SB ubicados en zonas urbanas densas, considerando parámetros como la distancia al operador incumbente, altura de la torre de transmisión, altura del edificio y potencia de transmisión.



## 4.2. ESCENARIOS Y MODELOS DEL SISTEMA

En esta sección se muestra el escenario de estudio, el modelado de las condiciones de interferencia, y el modelado de la ESA.

### 4.2.1. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO.

Para el presente estudio, se ha considerado un sector urbano denso de altas edificaciones homogéneas, que mantienen grandes necesidades de comunicaciones inalámbricas internas como un SB, y que forma parte de una SC, tal como se puede apreciar en la Fig. 4.1; en la misma figura también se muestra que los SB se encuentran dentro del área de cobertura de servicios inalámbricos brindados con sistemas de gran alcance (e.g. canales de TV) por parte de operadores incumbentes, que son los PS.

En el interior de cada SB, se considera la operación de un SS del tipo SR-CRWS por cada departamento; así también, se presupone la existencia de un despliegue de PU representado por una antena ubicada en el techo del edificio. Es importante destacar que dicha antena alimenta un sistema de distribución interno del servicio primario, no mostrado en la figura, que utiliza una red alámbrica (p.e. cable coaxial); de tal forma que el despliegue de PU será interferido solamente cuando la antena en el techo del edificio sea interferida.

Aunque sea común que los diferentes SB en una SC sean heterogéneos, en el presente estudio se considerará que la distribución interna en los SB es idéntica, por lo que cada edificio tendrá  $N$  departamentos de iguales dimensiones, lo que equivale a decir que existirán también, en cada piso, la misma cantidad de SR-CRWS que podrían hacer uso oportunista del espectro del PS.

Con el objeto de determinar la mínima cantidad de disponibilidad espectral en el interior del edificio, el estudio se realizará en el SB que reciba los máximos niveles de potencia del PS, lo cual se logra si una de las caras del SB presenta

incidencia normal a la dirección de propagación, y además mantiene línea de vista (LOS) desde todos sus pisos a la estación base (BS); los efectos de las reflexiones desde los edificios vecinos también serán considerados.

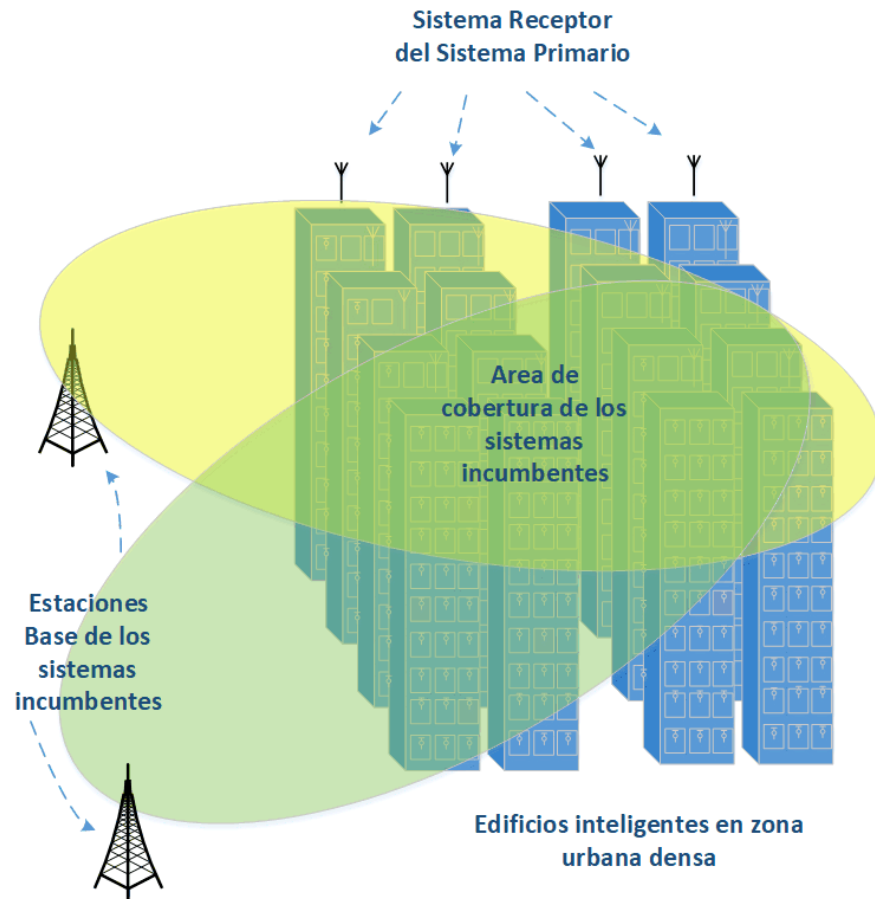


Fig. 4.1 Escenario que considera un despliegue de SR-CRWS y de PU dentro de un SB ubicado en un escenario urbano denso de una SC.

En la Fig. 4.2, se representa una estación base (Base Station (BS)) de un sistema de largo alcance situada frente a una cara de un SB de dimensiones  $d_{SB} \times d_{SB} \times H_B$ , separados una distancia perpendicular  $d$ , y que irradia un nivel de potencia  $P_{BS}$ . La BS tiene una antena con altura  $H_{BS}$  mientras que el SB tiene una altura  $H_B = H_p p$ , donde  $p$  representa el número de pisos del edificio y

$H_p$  la altura de cada piso. Dentro del SB operan en su interior tantos SR-CRWS como departamentos tiene el edificio, ubicados a una altura  $H_{SS}$ .

En la misma Fig. 4.2 se muestra un piso cualquiera del edificio, donde se destacan tres regiones, una de ellas son departamentos con fondo de color rojo, que representan el área donde no hay disponibilidad espectral; otra sección son departamentos con fondo de color blanco, los cuales indican el área interna donde existe disponibilidad de la banda primaria del PS; y, finalmente departamentos de fondo blancos con rayas rojas, que representan a la ubicación de los SS que producen interferencia al PS. En otras palabras, los departamentos que sólo tienen fondo blanco son los que disponen de ESA.

#### **4.2.2. MODELADO DE LAS CONDICIONES DE INTERFERENCIA**

En base a este escenario, se definen las dos condiciones de interferencia necesarias para estimar el ESA; la primera condición determina el uso del espectro primario, y la segunda verifica si se producen interferencias sobre el despliegue de PU dentro del edificio.

La primera condición se denominará Condición 1 (C1) y servirá para establecer la ausencia o presencia del PS; es decir, C1 permitirá identificar los departamentos donde la interferencia  $I_{BS-SS}$  recibida por los SS desde la BS no tendría el nivel suficiente para superar un nivel de referencia  $P_{TH}$ . En este estudio, el nivel de referencia es la sensibilidad de un receptor digital de Televisión Terrestre.

Ya que la determinación de C1 involucra un recorrido externo, con LOS desde la BS hacia el SB, y un recorrido interno sin línea de vista (NLOS) dentro del SB, se evaluarán varios modelos de propagación.

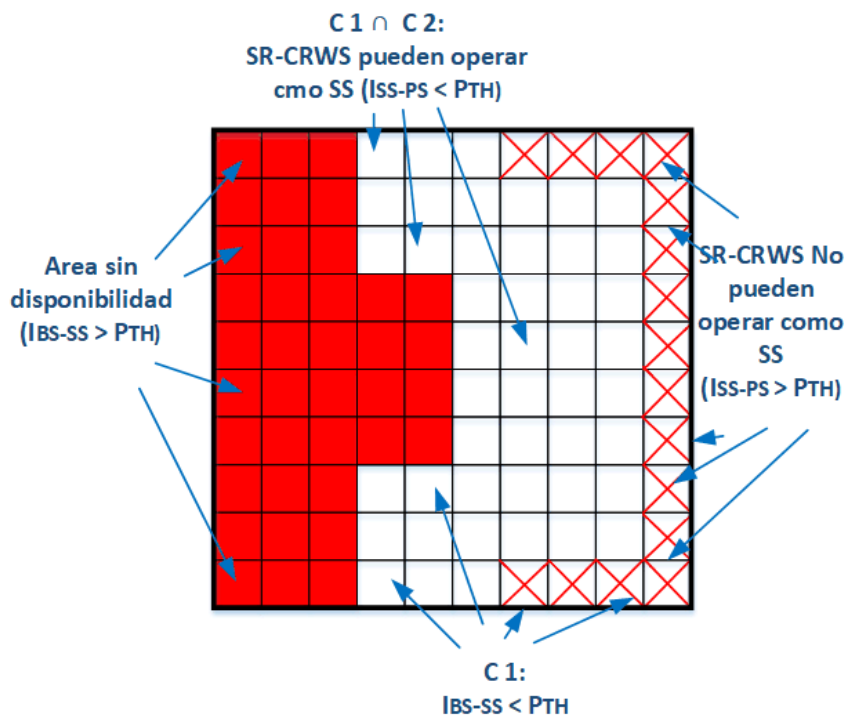
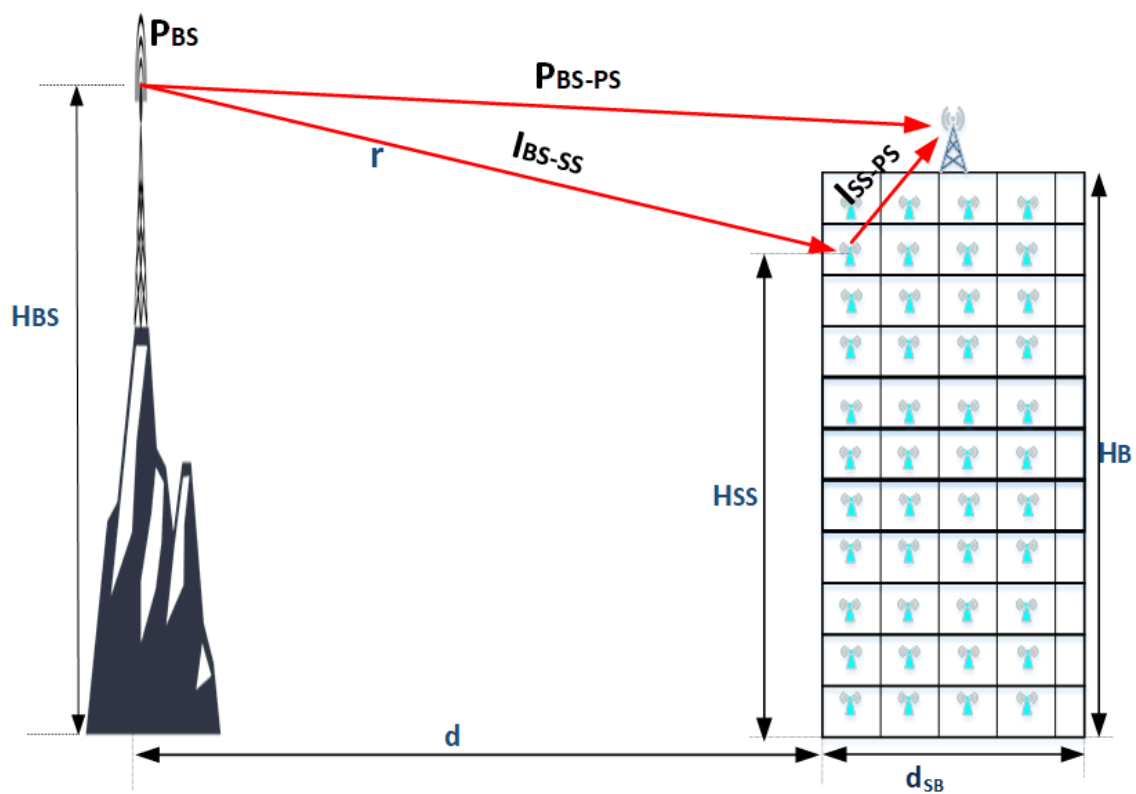


Fig. 4.2 Definición de parámetros y condiciones de interferencia para determinación de la ESA

Para el caso del recorrido interno, se evaluará el modelo de penetración de edificios sin línea de vista presentado en el COST 231 [75], y para el componente con línea de vista (LOS), a diferencia de [52] [53], se evaluarán tres modelos de propagación LOS conocidos: Modelo del Espacio Libre (FRIIS) [75], Modelo Egli de propagación (EGLI) [85] y el componente LOS del modelo COST231 Walfisch-Ikegami (COST-WI) [75]. Se consideró el modelo FRIIS porque es un buen indicador de pérdidas de trayectoria; el modelo EGLI porque toma en cuenta alturas de antenas de transmisión y recepción; y, se consideró el componente LOS de COST-WI porque es una referencia ampliamente utilizada. En este estudio, se escogerá al modelo que se correlacione de mejor manera con los resultados de dos campañas de medición.

La segunda condición, denominada Condición 2 (C2) permitirá determinar los departamentos desde los cuales un SR-CRWS no produciría interferencia sobre el receptor del PS ubicado en la terraza del edificio; para ello el nivel de interferencia  $I_{SS-PS}$  no deberá superar el nivel del umbral mínimo soportado por el receptor del PS. El mínimo umbral, al igual que en C1, es la sensibilidad de un receptor de TV. Para la determinación de C2 se evaluará el modelo Multi Wall Model (MWM) [75] respecto a la campaña de medición antes nombrada.

Con estos antecedentes, C1 y C2 se representan de la siguiente manera [52]:

$$C1: \begin{cases} Verdadera, & \text{si } I_{BS-SS} < P_{TH} \\ Falsa, & \text{si } I_{BS-SS} \geq P_{TH} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$C2: \begin{cases} Verdadera, & \text{si } I_{SS-PS} < P_{TH}; \\ Falsa, & \text{si } I_{SS-PS} \geq P_{TH}. \end{cases} \quad (4.2)$$

### 4.2.3. MODELADO DE C1

Las pérdidas de propagación entre la BS y el lugar donde se encuentra cada SS se pueden determinar utilizando el modelo presentado en "Penetration loss with NLOS conditions" [75] de la siguiente manera:

$$L_{BS-SS} = L_{outside} + L_{indoor} \quad (4.3)$$

$$L_{indoor} = W_e + W_{ge} + \max(nW_i, \alpha W_a) - G_{FH} \quad (4.4)$$

$$G_{FH} = \begin{cases} pG_n \\ hG_h \end{cases} \quad (4.5)$$

La pérdida de propagación entre la antena transmisora y la pared iluminada es  $L_{outside}$ , mientras que  $L_{indoor}$  representa la pérdida de propagación interna del SB;  $W_e$  es la atenuación de la pared exterior del edificio;  $W_{ge}$  compensa la penetración en las paredes exteriores;  $nW_i$  es la pérdida total considerando  $n$  paredes interiores;  $\alpha W_a$  representa la pérdida total ascendente y  $G_{FH}$  es una medida de la ganancia total debido a la altura del SS, si se conoce la ganancia por pisos  $G_n$  en dB/piso, el piso  $p$  donde se encuentra el SS, o se conoce la ganancia por altura  $G_h$  en dB/m y la altura  $h$ .

Es importante recordar que el componente  $L_{outside}$  será evaluado con tres modelos de propagación con condición LOS. La pérdida de propagación externa, de acuerdo con el modelo FRIIS se representa según (3.5).

Por otro lado, al considerar el modelo EGLI, las pérdidas por propagación se representan por la siguiente expresión [85]:

$$L_{egli} = -4.28 + 40 \log(r_{km}) + 20 \log\left(\frac{f_{MHz}}{40}\right) - 20 \log(H_{BS}H_{SS}) \quad (4.6)$$

donde  $H_{BS}$  es la altura de la antena de la estación emisora y  $H_{SS}$  es la altura del punto de medición.

El tercer modelo por considerar, COST-WI, está representado por la siguiente expresión [75]:

$$L_{WI} = 42.6 + 20 \log(f_{MHz}) + 26 \log(r_{Km}) \quad (4.7)$$

Para efectos de conseguir una alta precisión en los niveles de potencia, se considerará la contribución de los SB vecinos, y se usará un modelo de 5 rayos; tres rayos reflejados debido a los edificios vecinos, y dos rayos directos desde la BS, tal como se muestra en la Fig. 4.3. Los ángulos mostrados en la figura servirán para encontrar las componentes de la potencia en la dirección específica de los rayos incidentes y reflejados. Los 4 primeros rayos son calculados como componentes horizontales de la potencia recibida desde el sitio de transmisión, y el quinto rayo será la componente vertical de la potencia incidente que atraviesa el techo del edificio.

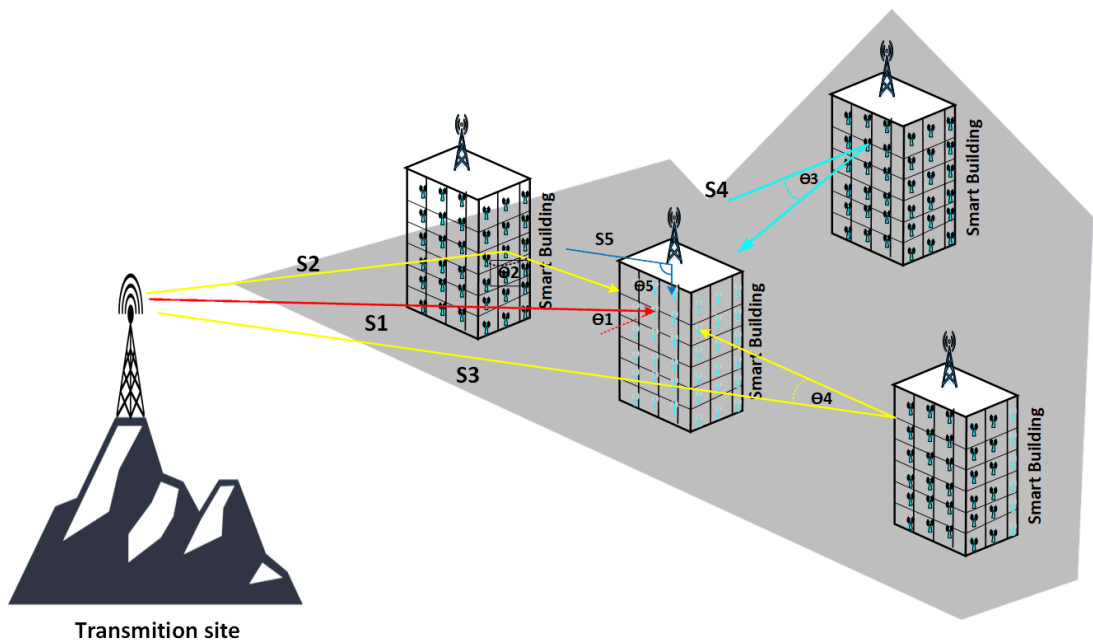


Fig. 4.3 Modelo de 5 rayos usado para calcular la potencia en interiores. Los rayos S1 y S5 son directos mientras que los rayos S2, S3 y S4 son reflejados desde los edificios vecinos.

La interferencia recibida en cada SS desde la BS será entonces:

$$I_{BS-SS} = \left( \sum_{j=1}^5 (P_{BS} - L_{outside_j} + 10 \log \cos \theta_j - L_{indoor}) \right) \quad (4.8)$$

$$I_{BS-SS} = \left( \sum_{j=1}^5 (P_{BS} - L_{outside_j} + 10 \log \cos \theta_j - L_{indoor}) \right) \quad (4.9)$$

donde  $j$  representa la trayectoria de la señal de la BS en cada una de las 4 caras y en el techo del edificio y  $\cos \theta_j$  es el factor que corrige la dirección del recorrido de cada rayo.

Por lo tanto, reemplazando (4.8) en (4.1), se obtiene que la C1 se determina de la siguiente manera:

$$C1: \begin{cases} \text{Verdadera, si } \left( \sum_{j=1}^5 (P_{BS} - L_{outside_j} + 10 \log \cos \theta_j - L_{indoor_j}) \right) < P_{TH} \\ \text{Falsa,} & \text{si } \left( \sum_{j=1}^5 (P_{BS} - L_{outside_j} + 10 \log \cos \theta_j - L_{indoor_j}) \right) \geq P_{TH} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$C1: \begin{cases} \text{Verdadera, si } \left( \sum_{j=1}^5 (P_{BS} - L_{outside_j} + 10 \log \cos \theta_j - L_{indoor_j}) \right) < P_{TH} \\ \text{Falsa,} & \text{si } \left( \sum_{j=1}^5 (P_{BS} - L_{outside_j} + 10 \log \cos \theta_j - L_{indoor_j}) \right) \geq P_{TH} \end{cases} \quad (4.11)$$

#### 4.2.4. MODELADO DE C2

La interferencia que puede causar un SS que esté usando dinámicamente el espectro del sistema primario sobre el despliegue de PU se encuentra usando la expresión:

$$I_{SS-PS} = P_{SS} - L_{SS-PS} \quad (4.12)$$



Donde  $L_{SS-PS}$  corresponde a la pérdida de propagación, utilizando MWM desde el SR-CRWS hasta el receptor del PS ubicado en la terraza del edificio; y  $P_{SS}$  es la potencia emitida desde el SR-CRWS. MWM está representada por (3).

Finalmente, reemplazando (4.11) y (4.12) en (4.2), la C2 se satisface cuando:

$$C2: \begin{cases} \text{Verdadera,} & \text{si } P_{SS} - L_{fS} + L_C + \sum_{i=1}^I k_{Wi} L_{Wi} + k_f^{\left[\frac{k_f+2}{k_f+1}-b\right]} L_f < P_{TH}; \\ \text{Falsa, si} & P_{SS} - L_{fS} + L_C + \sum_{i=1}^I k_{Wi} L_{Wi} + k_f^{\left[\frac{k_f+2}{k_f+1}-b\right]} L_f \geq P_{TH}. \end{cases} \quad (4.13)$$

#### 4.2.5. MODELADO DE LA ESA

ESA utiliza una métrica que representa el porcentaje del área interna del edificio desde la cual se puede reutilizar el espectro primario. Se obtiene de la relación entre el número de departamentos dentro de un SB desde donde un SR-CRWS puede operar como SS y la cantidad de departamentos del edificio.

Para estimar la ESA en cada piso del SB ( $ESAF$ ), se deben verificar C1 y C2 en cada uno de los departamentos del edificio, para determinar los que cumplen ambas condiciones al mismo tiempo. Con el fin de identificar a cada uno de esos apartamentos, se les asigna un valor binario en cada piso, de la siguiente manera:

$$(IDAF)_{i,p} = \begin{cases} 1, & \text{if } C1 \text{ y } C2 \text{ son verdaderas en el piso } p \\ 0, & \text{if cualquiera es falsa en el piso } p \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, N/p \quad (4.14)$$

Una vez que los apartamentos estén debidamente identificados se los agrupará por piso para determinar  $ESAF$ , tal como se muestra a continuación:

$$(ESAF)_j = \frac{p}{N} \sum_{i=1}^{N/p} (IDAF)_{i,j}; \quad j = 1, \dots, p \quad (4.15)$$

Por último, la ESA se determina con:

$$ESA = \sum_{j=1}^p (ESAF)_j \quad (4.16)$$

$$ESA = \frac{p}{N} \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^{N/p} (IDAF)_{i,j} \quad (4.17)$$

Es decir:

$$ESA = \frac{p}{N} \sum_{j=1}^p \left( \sum_{i=1}^{N/p} \left( \begin{array}{l} 1, \text{ si } \left( \sum_{k=1}^5 \left( 10 \log \cos \theta_k - (W_e + W_{ge} + \max(\Gamma_1, \Gamma_2) - G_{FH})_k \right) \right) < P_{TH} \cap \\ \left( P_{SS} - (L_{fs} + L_c + \sum_{n=1}^i k_{Wn} L_{Wn} + k_f^{\left[ \frac{k_f+2}{k_f+1} \right] b} \right)_{L_f} < P_{TH} \right) \\ 0, \text{ si } \left( \sum_{k=1}^5 \left( 10 \log \cos \theta_k - (W_e + W_{ge} + \max(\Gamma_1, \Gamma_2) - G_{FH})_k \right) \right) \geq P_{TH} \cup \\ \left( P_{SS} - (L_{fs} + L_c + \sum_{n=1}^i k_{Wn} L_{Wn} + k_f^{\left[ \frac{k_f+2}{k_f+1} \right] b} \right)_{L_f} \geq P_{TH} \right) \end{array} \right) \right)_{i,j} \quad (4.18)$$

Donde el componente  $L_{outside}$  se evaluará con el modelo de propagación que será validado en la siguiente sección.

### 4.3. VALIDACIÓN DE LAS CONDICIONES DE INTERFERENCIA

En esta sección se procede a la validación de los modelos de propagación que se usarán para determinar C1 y C2. Para ello se compararán los niveles de potencia recibidos en las campañas de medición con los niveles de potencia que se con los modelos de propagación. Para el caso de C1, la componente LOS  $L_{outside}$  de (30) será evaluada individualmente con (4.6), (4.7) y (4.8); y, C2 se evaluará con (4.12).

#### 4.3.1. ESCENARIO DE LAS CAMPAÑAS DE MEDICIÓN

Con el fin de evaluar los modelos de propagación propuestos, se llevarán a cabo campañas de medición de niveles de potencia en el interior de dos edificios del centro urbano de la ciudad de Guayaquil; siendo uno de ellos un edificio de 4 pisos y terraza, y el otro un edificio de 25 pisos.

Para validar a los modelos de propagación en los pisos bajos de un edificio, se hicieron mediciones en el interior del edificio pequeño, que se encuentra ubicado en las coordenadas  $(-2.220144^\circ, -79.888879^\circ)$  que tiene una altura de 16 m ( $H_B$ ). Para la radiación, se usará una BS simulada con un sistema de transmisión portátil en banda de TV, ubicada un edificio cercano; esto, para validar al modelo que será considerado en la componente externa para las simulaciones posteriores. De igual manera, se tomarán mediciones en el punto central de la terraza del edificio, simulando un sistema receptor de TV, radiando potencia con el mismo sistema de transmisión desde el interior del edificio, simulando ser un SR-CRWS, para validar el modelo MWM.

El sistema de transmisión a ser usado consiste en un generador RF de la marca Agilent, modelo E4433B emitiendo +20 dBm de potencia ( $P_{BS}$ ) y una antena de ganancia omnidireccional genérica que se instalará en la terraza de un edificio vecino de 23,4 m de altura ( $H_{BS}$ ), ubicado a una distancia de 16,5 m ( $d$ ); mientras que las mediciones dentro del edificio objetivo se realizarán con un analizador de espectro portátil Anritsu modelo MS2713E y una antena multibanda Discono modelo SIRIO 2000, como se muestra en la Fig. 4.4. La frecuencia de operación del sistema es 635 MHz ( $f$ ), ancho de banda de 1 MHz, con modulación FM.



Fig. 4.4 Sistema de Medición en el edificio pequeño. (a) Analizador de espectros Anritsu. (b) Generador RF, Agilent. (c) Sistema Transmisor. (d) Sistema Receptor

Para efectos de definir el modelo de propagación que se utilizará en las posteriores simulaciones, se registrarán los niveles de potencia en el punto medio de 3 departamentos frontales a la BS, en cada uno de los pisos de este edificio. Por otro lado, para validar el modelo MWM, el sistema de transmisión operará en cada piso, únicamente desde el interior del departamento central que se encuentra espacialmente debajo del sistema de recepción ubicado en la terraza.

En cambio, la validación de los modelos de propagación en los pisos altos se la realiza con la campaña de medición de los niveles de potencia de un canal de TV en el interior de un edificio de 25 pisos. El edificio Torres de la Merced, está ubicado en las coordenadas  $(-2.1903656, -79.8834593)$ , como se muestra en la Fig. 4.5, y se medirán los niveles de potencia del canal 25 UHF TV, usando el analizador de espectro portátil Anritsu modelo MS2713E y una antena multibanda Discono modelo SIRIO 2000. La BS del canal 25 UHF se encuentra

en el Cerro del Carmen a una altura aproximada de 50 m sobre el nivel del mar, mientras que los elementos radiantes están instalados en una estructura de 60 m sobre la referencia anterior.

Como se puede ver en la Fig. 4.5(a), la BS (punto B) está separado de las Torres de la Merced (punto A) por aproximadamente 1.16 km. Es importante tener en cuenta que este edificio alto tiene una torre de 16 pisos adosada a un lado con LOS a la BS como se aprecia en la Fig. 4.5(b).

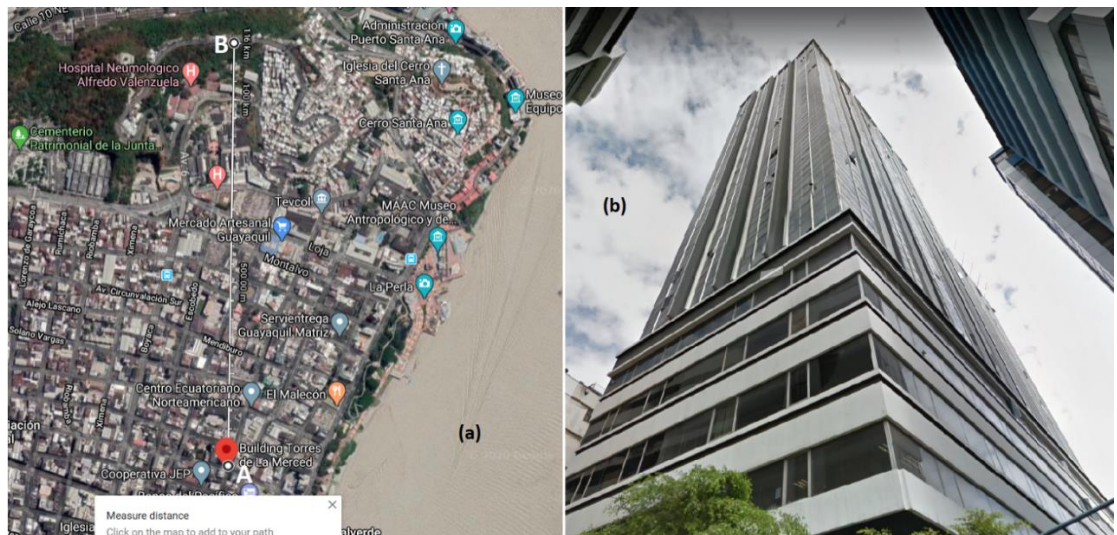


Fig. 4.5 (a) Ubicación y distancia de separación entre el edificio Torres de la Merced (punto A) y la BS del canal 25 UHF TV (punto B). (b) Vista parcial del edificio Torres de la Merced.

#### 4.3.2. VALIDACIÓN DE LA CONDICIÓN DE INTERFERENCIA C1.

Para validar la condición de interferencia C1, los niveles de potencia obtenidos de ambos escenarios, del edificio pequeño y del edificio alto se compararán por separado con los niveles de potencia que se obtienen utilizando cada uno de los tres modelos de propagación LOS en el componente  $L_{outside}$ .

En el caso del edificio pequeño, las comparaciones de los valores de potencia medidos y simulados se muestran en las Fig. 4.6 y 4.7, donde se pueden apreciar los valores de  $I_{BS-SS}$ , que son los niveles de interferencia recibida en todos los apartamentos del edificio donde se aplicaron los modelos de propagación propuestos para la C1.

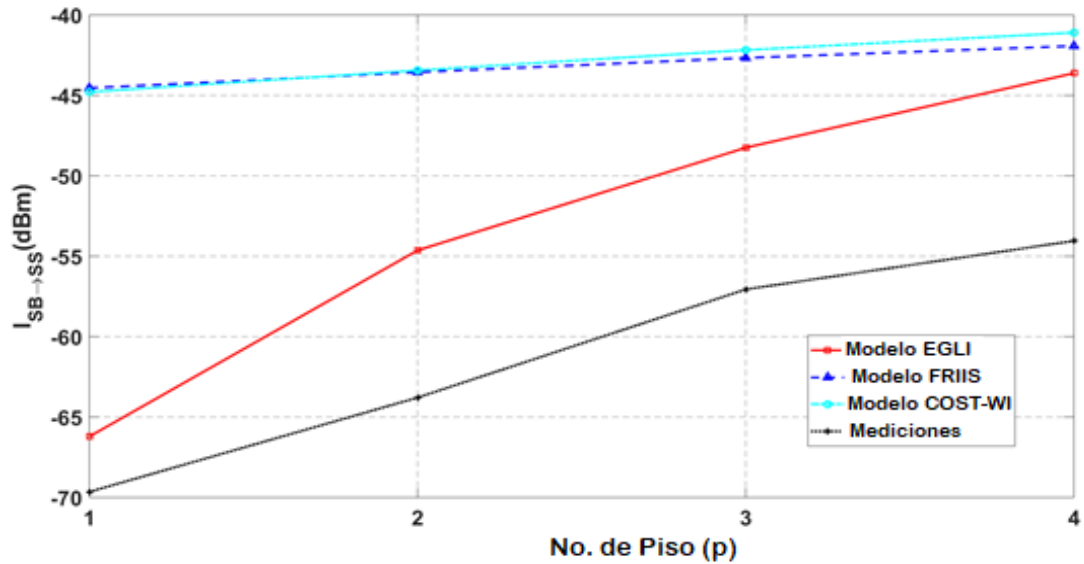


Fig. 4.6 Nivel de interferencia, simulado y medido, recibido en los departamentos ubicados en la cara frontal del edificio

En cada una de las figuras se observan los comportamientos de los niveles de potencia simulados en los departamentos del interior del edificio, así como el de sus mediciones realizadas; siendo el modelo de propagación FRIIS representado con línea azul, el modelo COST-WI con línea amarilla y el modelo EGLI, que se visualiza con una línea roja, mientras que las mediciones se representan con una línea negra. Como era de esperarse, se visualiza que los departamentos frontales reciben mayores niveles de interferencia que los departamentos ubicados en el centro del edificio y en la parte trasera del mismo.

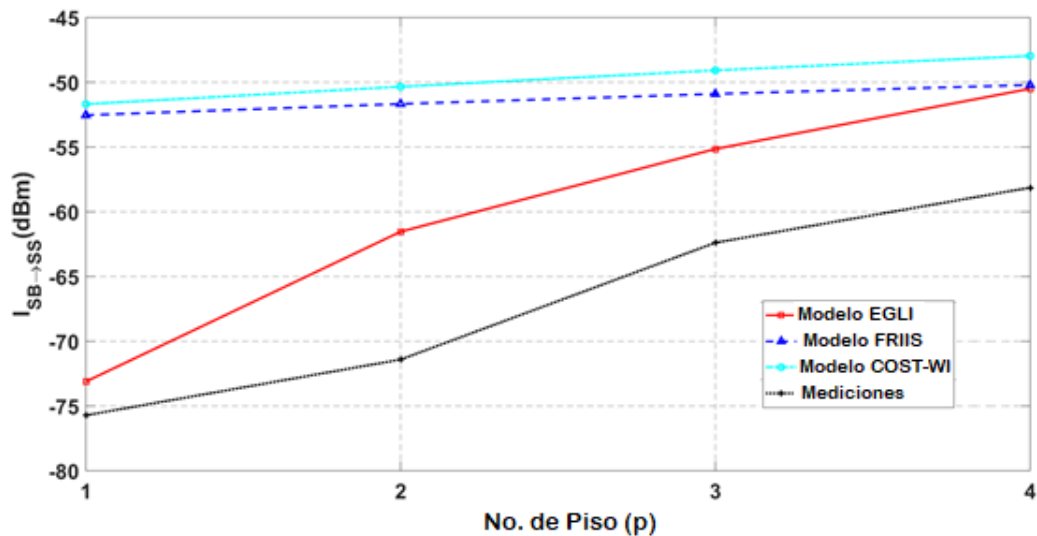


Fig. 4.7 Nivel de interferencia, simulado y medido, recibido en los departamentos ubicados en el sector medio del edificio

De la misma manera, en las Fig. 4.6 y 4.7, se puede apreciar que los niveles de interferencia se incrementan con la altura, lo cual es predecible puesto que, al aumentar la altura del punto de medición, éste se acerca cada vez más al sitio de transmisión. Se observa también en dichas figuras, que en las simulaciones con el modelo de propagación EGLI se obtienen comportamientos de niveles de interferencia similares a los niveles medidos; al contrario, los modelos COST-WI y FRIIS no presentan una gran variación de nivel de interferencia en los pisos bajos del edificio, debido a que ellos no consideran alturas para su determinación. Pero, cuando la altura de los pisos es similar a la altura de la antena de la SB, los tres modelos tienden a presentar un comportamiento similar.

Adicionalmente, en las mismas figuras se aprecia que los niveles de interferencia obtenidos con la campaña de medición son menores que los simulados. Esto se debe a que en la simulación no se contemplan todos los obstáculos reales del escenario; los cuales pueden estar estacionarios, como el mobiliario, o pueden estar en movimiento, como las personas al interior del edificio. Sin embargo, un análisis posterior permitirá establecer un nivel de confianza para las mediciones respecto de la simulación. Además, se observa que el modelo de propagación EGLI tiene el mejor comportamiento respecto de

los niveles de interferencia medidos. Por el contrario, los modelos COST-WI y FRIIS presentaron una variación significativa del nivel de interferencia en los pisos inferiores del edificio, y esto se debe a que no consideran alturas para su determinación. Sin embargo, los tres modelos de propagación tendieron a mostrar un comportamiento similar cuando la altura de los pisos se acercaba a la altura de la antena de la BS

Para el caso del edificio Torres de la Merced, en la Fig. 4.8 se muestran los valores de potencia medidos y simulados con los tres modelos de propagación. En la misma figura, se observa que los valores de potencia encontrados por simulación presentan un incremento brusco en el piso 16; ello es debido a que en las simulaciones se consideró la obstrucción del edificio adjunto.

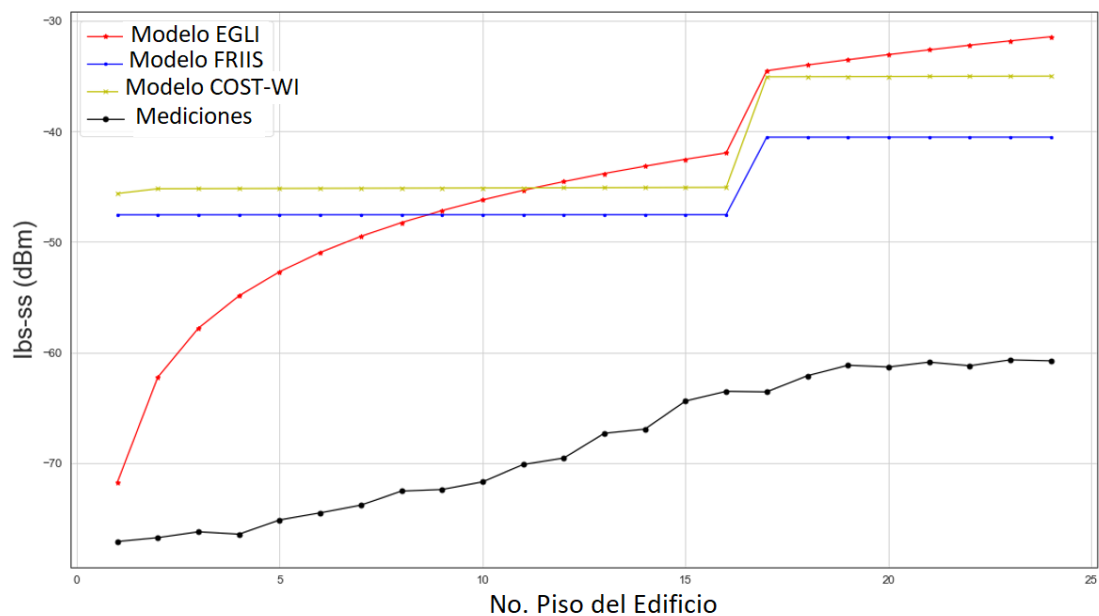


Fig. 4.8 Comportamiento de los niveles de potencia medidos y simulados en el interior del edificio Torres de la Merced.

El comportamiento simulado usando los modelos FRIIS y COST-WI se presenta con valores casi constantes en las dos secciones del edificio, mientras que el modelo EGLI mostró un comportamiento creciente. Se puede verificar que, al igual que en el edificio pequeño, el comportamiento del modelo EGLI



fue más adecuado que los otros modelos, especialmente en los pisos inferiores del edificio.

Para establecer el mejor comportamiento simulado en ambas campañas de medición, se realizará un análisis de los coeficientes de correlación de las mediciones con cada uno de los modelos en estudio. En la Tabla 4-1 se muestran los valores de los coeficientes de correlación, donde se puede apreciar que todos los modelos de propagación simulados se correlacionan bastante bien con las mediciones realizadas; sin embargo, también se muestra que el modelo de propagación que presenta el coeficiente de correlación más alto es el EGLI. Por tal razón, y de acuerdo con los objetivos planteados, en lo que sigue de este trabajo sólo se utilizará el modelo EGLI para el componente  $L_{outside}$  en la evaluación de la C1, tal como se explicó en la sección anterior.

*Tabla 4-1 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN: MODELOS DE PROPAGACIÓN VS. MEDICIONES*

<i>Modelo de Propagación</i>	<i>EGLI</i>	<i>FRIIS</i>	<i>COST-WI</i>
Mediciones Edificio 5 pisos	0.97	0.72	0.79
Mediciones Edificio 25 pisos	0.93	0.81	0.82

#### **4.3.3. INFLUENCIA DEL SHADOWING Y RUIDO TÉRMICO.**

Durante una campaña de medición, los valores instantáneos de potencia presentan variaciones con cambios de nivel muy rápidos, por lo que debe considerarse la influencia de los fenómenos de shadowing en el valor promedio de las mediciones y en el valor simulado.

Además, teniendo en cuenta que los valores obtenidos con un modelo de propagación también son valores promedios, y considerando que el fenómeno de shadowing es un proceso aleatorio, se puede intuir que los valores simulados puedan variar dentro de un rango. Esta variación puede representarse con un parámetro conocido como intervalo de confianza (IC), que depende de la desviación estándar producida por el shadowing.

La desviación estándar de un modelo de propagación  $\sigma_S$ , debido al shadowing, para el caso de macro-celdas puede determinarse a partir de la expresión siguiente [86]:

$$\sigma_S = 0.65(\log f_c)^2 - 1.3 \log f_c + 5.2 \quad (4.19)$$

El valor de las pérdidas por shadowing  $L_S$  se encuentra usando:

$$L_S = \sigma_S t \quad (4.20)$$

Donde  $t$  es encontrado a partir de la probabilidad  $p_{cM}$  de estar dentro de la cobertura de la macro-celda:

$$p_{cM} = 1 - Q(t) \quad (4.21)$$

siendo  $Q(t)$  la función distribución de cola de la distribución normal [86]. Debido al shadowing, la potencia recibida puede ser mayor o menor que el valor de potencia calculado por un modelo de propagación, entonces, los límites superior e inferior de los valores de potencia obtenidos por simulación definen un IC calculado a partir de los valores de interferencia medidos.

En la Fig. 4.9 se muestra un sector sombreado alrededor de la línea roja, que indica la zona probable de los niveles de interferencia del modelo EGLI considerando un IC de 95%, comparada con las mediciones realizadas en el apartamento central del edificio. En la gráfica puede observarse que los valores obtenidos en la campaña de medición se encuentran completamente dentro del intervalo de confianza dado por las simulaciones.

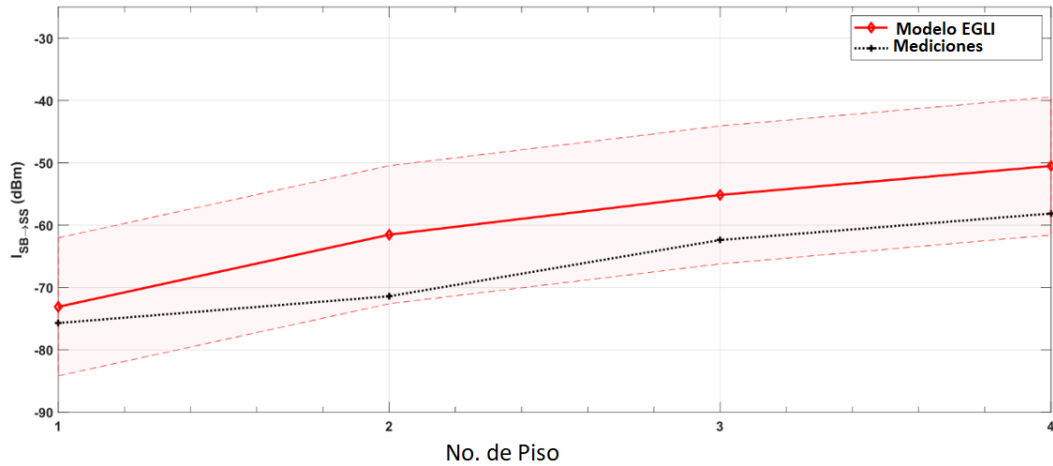


Fig. 4.9 Variación de los niveles de interferencia simulados con el modelo EGLI considerando IC=95% en los apartamentos del sector medio del edificio, comparada con las mediciones realizadas.

El fenómeno de shadowing es un ruido multiplicativo en el canal de comunicaciones, donde además intervienen otros ruidos denominados aditivos, como el ruido blanco y el ruido térmico; los niveles de potencia de los ruidos aditivos también pueden influir en mayor o menor medida en el nivel de potencia de la señal recibida. Los niveles de ruido blanco dependen directamente de la contaminación electromagnética del entorno de estudio, mientras que el nivel del ruido térmico producido en un receptor puede calcularse de acuerdo con [86], considerando una temperatura de  $27^{\circ}\text{C}$ :

$$N_{dBm} = -174 + 10 \log(B) + F_{dB} \quad (4.22)$$

donde  $B$  es el ancho de banda del canal en Hz y  $F_{dB}$  es la cifra de ruido del dispositivo en dB.

Considerando un canal de TV de 6 MHz de ancho de banda y un receptor de TV con una cifra de ruido promedio de 8 dB, usando (4.22) se obtiene un ruido total de -98 dBm en el receptor, lo que da un margen de 23 dB con respecto al nivel de referencia  $P_{TH}$  utilizado en este trabajo; este margen también permitiría controlar las variaciones en el nivel de potencia debido al ruido blanco. Por estas razones, este estudio no lleva a cabo un estudio más detallado sobre la influencia

de los ruidos aditivos, ya que estos presentan niveles de potencia mucho más bajos que el nivel de potencia del umbral de referencia.

#### 4.3.4. VALIDACIÓN DE LA CONDICIÓN DE INTERFERENCIA C2.

De manera similar al caso anterior, se procederá a validar el comportamiento del modelo MWM utilizado por la C2 para determinar la posible interferencia  $I_{SS-PS}$  sobre el sistema de recepción del servicio primario ubicado en la terraza del edificio. Se debe enfatizar que, para la toma de las mediciones de la interferencia, se instaló al sistema receptor en el sector medio de la terraza y el sistema transmisor operó desde la posición central de cada piso del edificio.

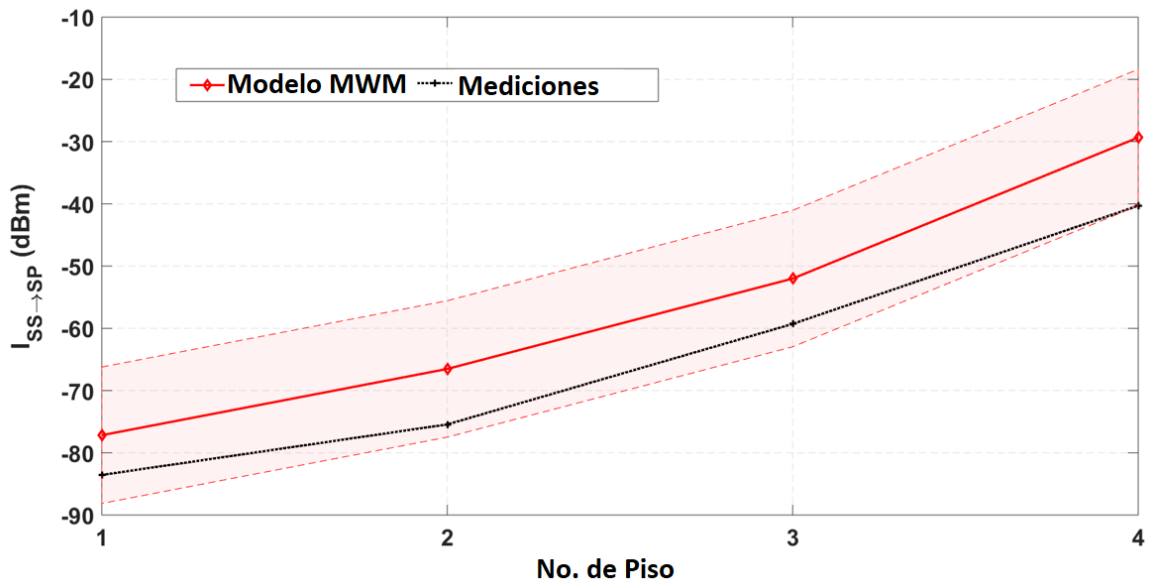


Fig. 4.10 Comportamiento de los niveles de interferencia simulados con MWM y las mediciones realizadas en la terraza del edificio, incluyendo el IC=95%.

La comparación de los valores medidos (línea negra) contra los valores obtenidos en la simulación con el modelo MWM (línea roja) se muestra en la Fig. 4.10; las líneas rojas discontinuas muestran los límites máximos y mínimos del intervalo de confianza IC=95% debido al shadowing. En esta figura se puede apreciar que el comportamiento de los valores del modelo tiene un

comportamiento similar y que la totalidad de los valores de las mediciones se encuentran dentro de la zona que limita al intervalo confianza. Debido a que se calculó que la correlación entre los datos medidos y simulados es de 98.78%, la C2 se valida completamente usando el modelo MWM.

#### **4.4. RENDIMIENTO DEL MECANISMO DE ESTIMACIÓN DE ESA.**

Una vez que se validaron, tanto el modelo EGLI para la condición de interferencia C1, como el modelo MWM para C2, se procede a ejecutar el mecanismo para obtención de la ESA y analizar su desempeño, usando los parámetros mostrados en la Tabla 4-2. El primer análisis de los resultados se refiere a la ESAF (ESA por piso) y luego se realiza el análisis de la ESA en el edificio.

Los resultados indican que se obtienen altos niveles de ESAF en los pisos más bajos de los SB y que va decreciendo a medida que se aumenta la altura del edificio hasta que la ESAF sea nula en los dos últimos pisos, tal como se puede observar en la Fig. 4.11. En otras palabras, este resultado nos indica que en los dos últimos pisos del edificio no podrían operar los dispositivos SR-CRWS, porque se encuentran cerca de la terraza donde se encuentra la antena del sistema de PU. Las cantidades altas de la ESAF en los pisos bajos se debe a que la C1 se cumple en la mayoría de los apartamentos de este sector, y va disminuyendo a medida que se consideran los pisos superiores pues los niveles de potencia se incrementan; sin embargo, en los dos últimos pisos del SB prevalece la C2 sobre la C1, por lo que la disponibilidad decae hasta ser nula.

También se puede observar en la misma Fig. 4.11, que la ESAF empieza a decaer rápidamente en los últimos 4 pisos del edificio; esto se debe porque la condición de interferencia C2 comienza a prevalecer sobre la C1. De hecho, se observa que la disponibilidad por piso en los edificios de 20 y 40 pisos se mantiene igual hasta el piso 16, donde la ESAF empieza a decaer rápidamente para el edificio de 20 pisos y lentamente hasta el piso 36 para el edificio de 40 pisos.

*Tabla 4-2 PARÁMETROS USADOS EN LA OBTENCIÓN DE LA ESA*

<b>Parámetro</b>	<b>Definición</b>	<b>Valor</b>
$H_{BS}$	Altura de torre	400 m
$H_B$	Altura del SB	80-400 m
$H_p$	Altura del piso	4 m
$d_D$	Ancho del departamento	4 m
$d_{SB}$	Ancho del SB	80 m
$p$	Número de pisos	20–100 floors
$N/p$	Departamentos/piso	400
$P_{BS}$	Potencia efectiva radiada por BS	37 dB
$P_{TH}$	Potencia de referencia	-75 dBm
$f$	Frecuencia central	639 MHz
$d$	Distancia de SB a BS	0.5–32 Km
$P_{SS}$	Potencia del SS	20 dBm

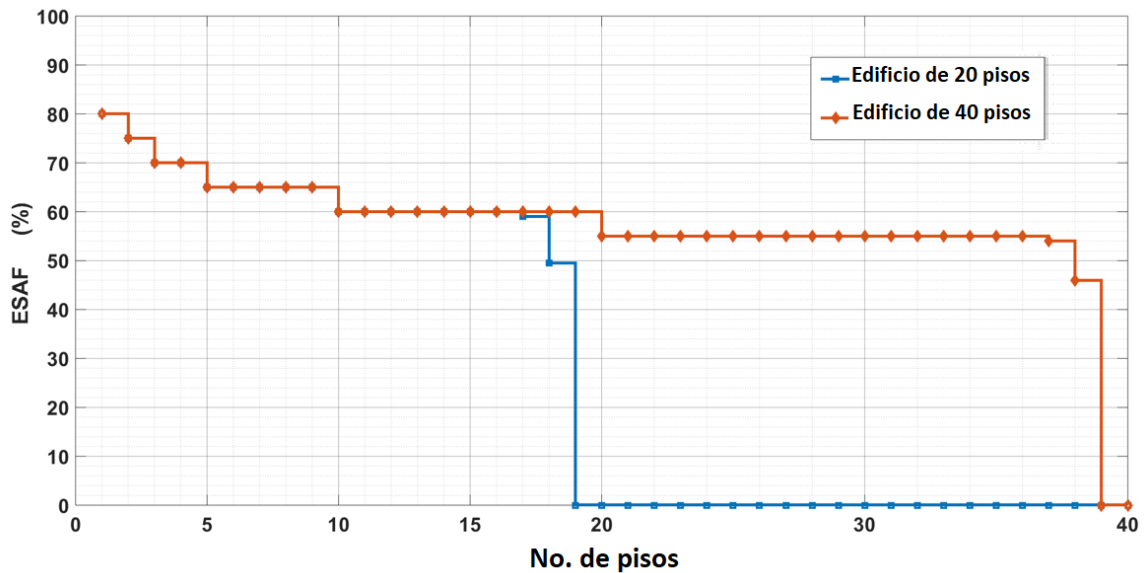


Fig. 4.11 Comportamiento de la ESAF para edificios de 20 pisos y de 40 pisos. Nótese que en los dos últimos pisos de cada edificio no existe disponibilidad.

En el caso de un edificio más alto como un SB de 100 pisos, la ESAF empieza a decrecer con un ritmo más rápido a partir del piso 50, decreciendo rápidamente hasta ser nula en el piso 99, tal como se muestra en la Fig. 4.12; el comportamiento de la ESAF a partir del piso 50 se debe a que la contribución de potencia de los rayos reflejados en los edificios vecinos ya tienen suficiente nivel como para lograrla disminuir la disponibilidad por piso, aunque de igual manera que en los casos anteriores, decrece abruptamente en los últimos 4 pisos, por la prevalencia de la C2.

El siguiente análisis se centra en los resultados de la ESA para SBs de varios tamaños, cuyo comportamiento se relacionó con la distancia entre el edificio y la BS. En la Fig. 4.13 se puede observar el comportamiento de la ESA para edificios de 20 a 100 pisos cuando  $d$  varía entre 0.5 KM y 32 Km; así mismo, se puede observar que la ESA total de un SB de 40 pisos se distribuye en el 67% del área total del edificio, mientras que para un SB de 80 pisos la ESA corresponde al 58% del área total y para un SB de 100 pisos, la ESA está ocupando el 52% del área total del edificio, cuando los SB está situados a 2 Km de la BS.

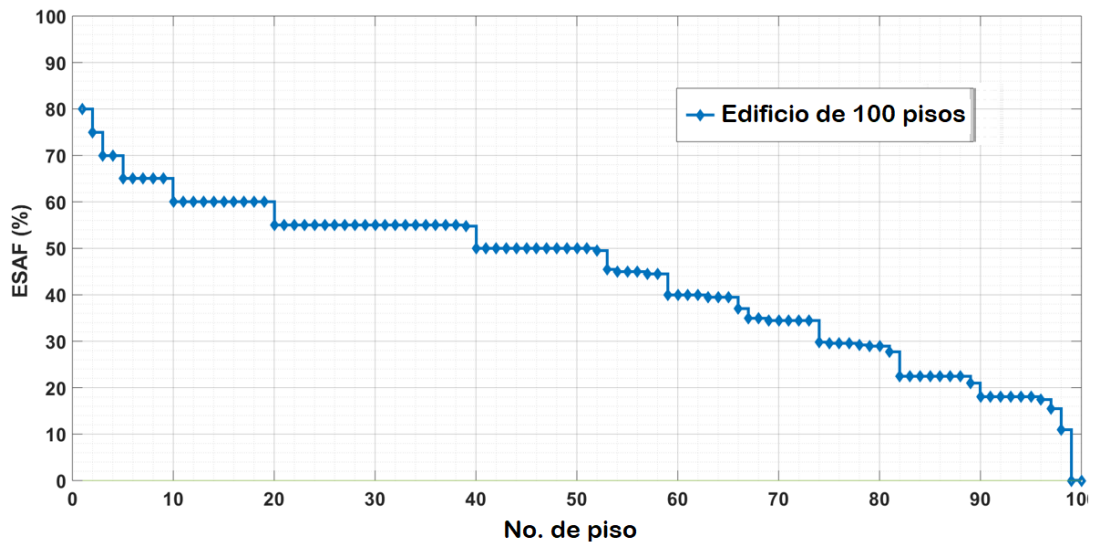


Fig. 4.12 Comportamiento de ESAF para un edificio de 100 pisos,  $d=1$  Km.

La Fig. 4.13 también muestra que los edificios más altos presentan menos ESA que los edificios más pequeños comparados a una misma distancia  $d$ ; comportamiento que se mantiene independientemente de la separación que tenga el SB respecto de la BS. Esto implica que un SB pequeño es más eficiente conteniendo ESA que un SB grande, comportamiento que se debe al hecho de que, a medida que el SB crece, el ESAF en los pisos altos decrece; sin embargo, decir que un SB muy alto tiene menos eficiencia conteniendo ESA que uno bajo, no implica decir que tenga menor cantidad de departamentos con ESA.

De una manera general, puede decirse que, para valores pequeños de  $d$ , se obtienen bajos valores de ESA, y que la ESA crece a medida que  $d$  crece; es más, se ha encontrado que, hasta los 16 Km de separación, un SB mejora su ESA entre el 7% y el 9% cada vez que  $d$  se duplica. Si se considerara diseñar un nuevo SB que disponga de un ESA predeterminada, se podría conseguir la ESA objetivo variando la altura del edificio o desplazándolo desde algún punto de referencia.



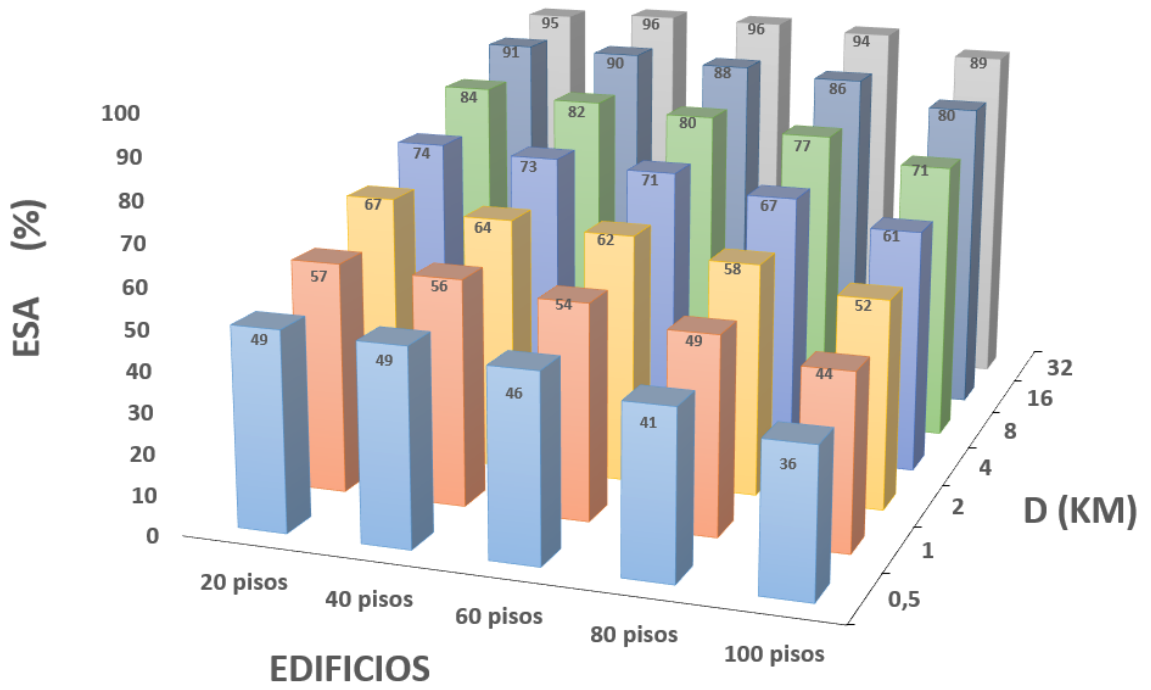


Fig. 4.13 Comportamiento del ESA para edificios de diferente altura, separados una distancia  $d$  desde la BS.

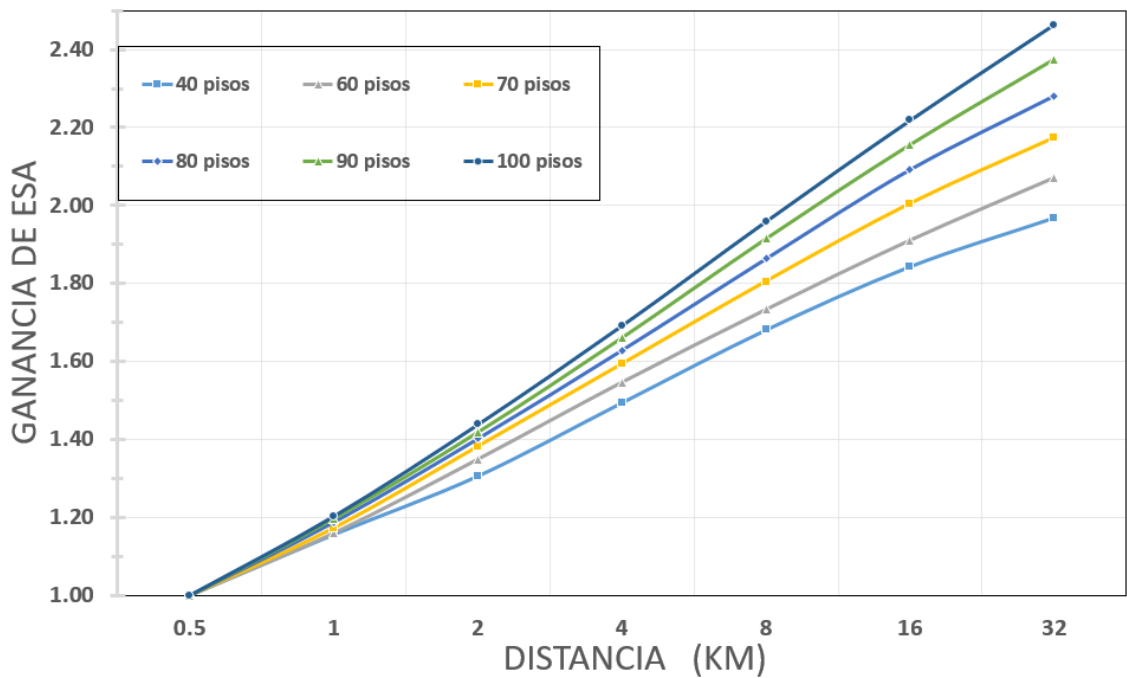


Fig. 4.14 Ganancia de la ESA considerando un SB de 40 pisos ubicado a  $d = 0.5$  Km como referencia.

La Fig. 4.14, en cambio, muestra la ganancia de ESA que puede lograr un SB, si se lo compara con un SB de referencia de 40 pisos ubicado a  $d = 0.5$  Km de la BS; así, un SB de 60 pisos tiene una ganancia de ESA de 1,16 si el edificio se desplaza 500m del punto de referencia, pero, la ganancia será de 2.07 si tal separación es de 32 Km. Así mismo, un SB de 100 pisos presenta una ganancia de 1.79 en el primer caso, y 2.31 en el segundo caso.

Finalmente, en la Tabla 4-3 se presenta un mapeo de la ganancia de ESA que se obtendría variando las ubicaciones y alturas de los edificios, al tomar como referencia un SB de 40 pisos ubicado a 0.5 km de la BS. La utilidad de este mapeo se ilustra con un ejemplo: para determinar el tamaño y la ubicación de un SB que tenga el doble de ESA que el edificio de referencia, se identifican en la Tabla 4-3 varias opciones: colocar un SB de 40 pisos a 32 km de la BS, ubicar un SB de 50 pisos en  $d = 8$  km, o considerar un SB de 80 pisos ubicado a 1 km de la BS.

*Tabla 4-3 MAPEO DE GANANCIA DE ESA*

$d \setminus p$	40	50	60	70	80	90	100
<b>0.5 Km</b>	1.00	1.23	1.42	1.57	1.70	1.79	1.86
<b>1 Km</b>	1.16	1.41	1.65	1.84	2.01	2.14	2.24
<b>2 Km</b>	1.31	1.61	1.92	2.17	2.38	2.54	2.67
<b>4 Km</b>	1.49	1.85	2.20	2.51	2.76	2.97	3.14
<b>8 Km</b>	1.68	2.08	2.46	2.84	3.16	3.43	3.64
<b>16 Km</b>	1.84	2.28	2.72	3.15	3.55	3.86	4.12

---

<b>32 Km</b>	1.97	2.46	2.94	3.42	3.87	4.25	4.58
--------------	------	------	------	------	------	------	------

---

#### 4.5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este capítulo se muestra el modelado y rendimiento de un mecanismo para determinar la ESA dentro de un SB. Este mecanismo permitiría determinar de manera rápida y precisa la factibilidad de proporcionar servicios privados o públicos utilizando un despliegue de SR-CRWS en el interior de un SB, destacando que los resultados se estimaron con un IC del 95%. Los resultados obtenidos indican que, debido a la configuración del despliegue de los PU, ningún SB alcanza el 100% de eficiencia de ESA, ya que los dos últimos pisos de estos edificios no pueden usarse para la operación de un SR-CRWS; no obstante, se considera que esos dos últimos pisos podrían ser dedicados a salas de control del SB.

Aunque el mecanismo para obtener la ESA basó sus resultados en el uso de la frecuencia central de un canal de TV específico, se puede decir que la disponibilidad espacial encontrada tendría aproximadamente el mismo comportamiento para todos los canales de TV si las transmisiones se realizasen desde una sola torre, como sucede en algunas ciudades grandes; en el caso de que esta situación no se diera, los resultados variarían según la ubicación de las BSs. Dentro de una zona con ESA, dos o más SR-CRWS podrían reusar la misma disponibilidad de espectro porque los SS admiten interferencia hasta un SNR límite; es decir, los SS autorregularían el uso compartido de la disponibilidad de espectro. Sin embargo, para diferenciar la transmisión de un SS de la transmisión de la BS primaria, los SR-CRWS deberían operar transmitiendo algún elemento distintivo, como un beacon adicional que permita identificar su transmisión.

A medida que pasa el tiempo, la escasez de espectro también podría amenazar a las bandas de espectro autorizadas para los nuevos sistemas; por lo que se considera necesario fomentar el uso la disponibilidad espacial del espectro, siempre que se cumplan las condiciones de operación. Los interiores de los edificios son lugares adecuados para reutilizar frecuencias no utilizadas, tanto espacial como temporalmente;

por esta razón, los SB podrían diseñarse para obtener el ESA deseado, lo cual puede lograrse variando las alturas y distancias desde el BS.



---

## 5. MECANISMO BASADO EN DEEP LEARNING PARA PREDICCIÓN DE ESA

---

En este capítulo se pretende predecir la disponibilidad espectral en el interior de un edificio a partir del conocimiento histórico del comportamiento del nivel de potencia de los sistemas primarios, es decir de los resultados de una campaña de medición; para efectos de este mecanismo, no será necesario conocer el comportamiento de los usuarios primarios, porque se propone un sistema de despliegue interno de usuarios primarios que les asegura disfrutar al 100% su servicio, siendo transparente para ellos el reuso del espectro.

Por otro lado, ya que varios estudios ([79] [80] [82]) reportan el hecho de que los errores de predicción se incrementan a medida que incrementa la variabilidad de los datos históricos, se hará uso de una transformación no lineal de los datos de entrada para corregir la alta variabilidad de los niveles de potencia que presenta una señal en el tiempo.

### 5.1. INTRODUCCIÓN

Diversos estudios [9] [10] [11] [12] [13] [14] [87] realizados tanto en áreas rurales como urbanas han demostrado que existe una disponibilidad del espectro con licencia que podría ser accesado dinámicamente para prestar el mismo u otros servicios brindados por un nuevo operador o por los mismos operadores tradicionales [88]. Así mismo, se ha demostrado que la disponibilidad interna del espectro del edificio es mayor que la disponibilidad del espectro externo [8] porque en el interior de un edificio hay varios obstáculos fijos y móviles que producen disponibilidad temporal del espectro.

La disponibilidad en el interior de edificios puede ser provecha por sistemas basados en CR y DSA; pues el objetivo de CR es aumentar la eficiencia en el uso del espectro.

Para operar en interiores, CR debe sensar el espectro y determinar la disponibilidad existente; siendo el método de sensado más común el denominado sensado de energía. Si se quisiera hacer uso de la disponibilidad temporal, mientras más largo sea el tiempo de una sesión de sensado del espectro, se obtendrán mejores resultados de disponibilidad; pero, en cambio se reducirá el tiempo asignado a la transmisión del dispositivo [22]. Y, en el peor de los casos, se podría perder la oportunidad de transmitir. En otras palabras, el método del sensado de energía puede llegar a consumir grandes cantidades de energía y tiempo, convirtiéndose en un problema importante [31].

Una solución a este problema sería que el dispositivo secundario no busque la disponibilidad espectral en tiempo real, sino que el dispositivo la conozca con anticipación; es decir, pueda disponer de un algoritmo de predicción de los estados del espectro. Entre otros, los métodos de predicción de disponibilidad espectral más utilizados se basan en Inferencia Bayesiana, Modelos Ocultos de Markov, Redes Neuronales Artificiales y Modelos Autoregresivos [34]. Con ello se mejora la eficiencia en el uso del espectro electromagnético, por lo que la predicción del espectro se convierte en una opción para nada despreciable para compartir espectro, permitiendo así una coexistencia o cooperación entre sistemas que operan tanto en el segmento licenciado como el no licenciado [35].

En este capítulo, se pretende introducir un método novedoso que permita predecir el comportamiento del espectro, basado en Aprendizaje Profundo y en técnicas de modulación/demodulación, para luego encontrar la disponibilidad espectral.

## **5.2. MODELO DEL MECANISMO DE PREDICCIÓN DEEP LEARNIG**

En esta sección se describirán el escenario, los procesos de modulación, predicción LSTM [89] y demodulación que se realizarán en el mecanismo de predicción. Para este fin, todos los procesos se correrán en lenguaje Python con visualización Jupyter Notebook 3.0 en una computadora personal Dell, core i7, 8th Gen.

### 5.2.1. ESCENARIO DE LA PREDICCIÓN

El presente estudio se desarrolla en el interior de un edificio ubicado en un sector urbano denso de altas edificaciones que mantienen grandes necesidades de comunicaciones inalámbricas internas (e.g. un edificio inteligente), tal como se puede apreciar en la Fig. 5.1. Allí también se muestra que el edificio se encuentra dentro del área de cobertura de un sistema de gran alcance (e.g. un canal de TV) que brinda un operador incumbente.

En el interior del edificio, se considera la operación de un sistema de corto alcance con capacidad radio cognitiva por apartamento como SS. Así también, se considera la existencia de un despliegue de usuarios primarios representado por una antena receptora de TV ubicada en el techo del edificio formando un sistema de forma tal que el despliegue de usuarios del sistema incumbente será interferido cuando la antena receptora en el techo del edificio sea interferida.

De acuerdo con los resultados de [52], que utiliza un escenario similar a este, para que un SS pueda interferir a los usuarios primarios debería estar operando dentro de los últimos 5 pisos del edificio. Por lo que se tomaron mediciones del nivel de potencia de toda la banda de TV con barridos cada 7.2 s durante 5 días, en el piso 3 de un edificio de 10 pisos ubicado en la zona central de la ciudad de Guayaquil. Los datos utilizados en estas predicciones son promedios por canal y sus valores son transparentes a los fenómenos de reflexiones y shadowing que pudieron presentarse durante las mediciones.



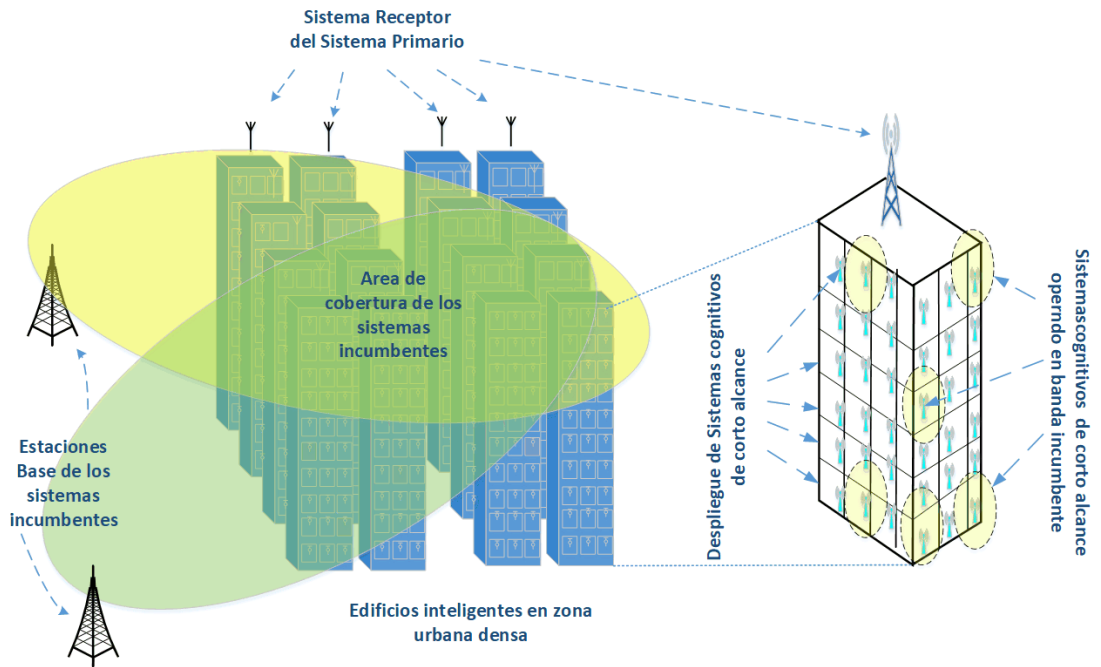


Fig. 5.1 Escenario de estudio mostrando despliegue de sistemas de corto alcance dentro de un edificio

### 5.2.2. PROCESO DE MODULACIÓN PARA PREDICCIÓN DEL ESPECTRO

En la Fig. 5.2 pueden verse los procedimientos a realizarse para el proceso de predicción espectral; los cuales están numerados para su comprensión. El cuadro 1 implica la lectura de datos, que son los promedios del nivel de potencia en los 6 MHz del ancho de banda de un canal de TV, y que se obtuvieron de la campaña de medición anteriormente descrita.

Los  $M$  datos leídos se representan por la variable discreta  $m[n]$ , que se divide en dos componentes, tal como se muestra a continuación:

$$m[n] = m_p[n] + m_{tt}[n] \quad (5.1)$$

donde  $m_p[n]$  representa al conjunto de  $M_p$  primeras muestras que se reservan para la predicción espectral y  $m_{tt}[n]$  son las  $M_{tt}$  muestras restantes que servirán para el entrenamientos y pruebas del modelo de predicción. El cuadro 2 de la

misma Fig. 5.2, representa un proceso de transformación no lineal de los datos de entrada. Esta transformación es necesaria para suavizar los cambios bruscos del nivel de potencia, para tratar reducir los errores debidos a la variabilidad de los datos. La transformación no lineal usada en este trabajo es una modulación angular en fase [90], expresada de la siguiente manera

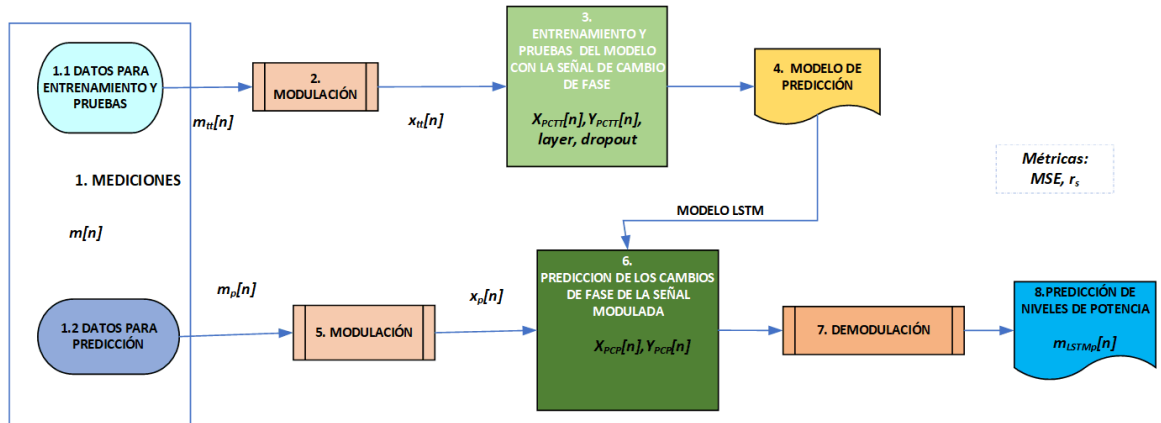


Fig. 5.2 Diagrama de Flujo de los procesos de entrenamiento, modulación/demodulación y predicción de los niveles de potencia.

$$x_{tt}[n_c] = A \cos(2\pi f_c n_c + k m_{tt}[n]) \quad (5.2)$$

Aquí,  $x_{tt}[n_c]$  es la señal modulada en fase,  $A$  es una amplitud unitaria,  $f_c$  es la frecuencia de la señal portadora,  $n_c$  es la unidad temporal de las muestras de la señal portadora,  $n$  es la unidad temporal de las mediciones, y  $k$  es el índice de modulación.

Debido a que  $n_c \ll n$ , para lograr un ahorro en el tiempo de procesamiento y memoria en el proceso de la predicción, se consideró utilizar las muestras de la señal modulada que contienen únicamente los cambios de fase, creando así la señal  $X_{PCTT}$  a partir de la señal  $x_{tt}[n_c]$ , tal como se muestra a continuación:

$$X_{PCTT}[n] = x_{tt}[n_c] \forall (n_c = n) \quad (5.3)$$

En el cuadro 3 de la Fig. 5.2 se puede ver que el siguiente procedimiento es establecer un modelo de aprendizaje profundo para poder entrenarlo y probarlo. En este estudio, el modelo que se escogió es un algoritmo LSTM, pues es el modelo que se utiliza en aprendizaje profundo para problemas de series de tiempo [91] tal como es el comportamiento del nivel de potencia del espectro, y además porque brinda nuevas oportunidades para retos innovadores [63].

LSTM está formado por unidades complejas denominadas celdas de memoria [92], tal como se muestra en la Fig.5.3. Esta celda presenta tres puertas que son puerta de entrada, puerta de salida y puerta para olvidar. Precisamente, esta última puerta tiene el objetivo de poder excluir información relacionada con el estado escondido en el tiempo anterior y la entrada en el tiempo actual; su salida viene dada por la expresión siguiente [93]:

$$f_n = \sigma(W_f[h_{n-1}, X_n] + b_f) \quad (5.4)$$

donde  $f_n$  es la salida de la forget gate,  $\sigma$  es la activación sigmoideal,  $W_f$  son los pesos encontrados en la forget gate,  $b_f$  son los bias de las neuronas de la forget gate,  $h_{n-1}$  es el valor del estado escondido en el tiempo anterior y  $X_n$  es la entrada en el tiempo actual  $n$ .

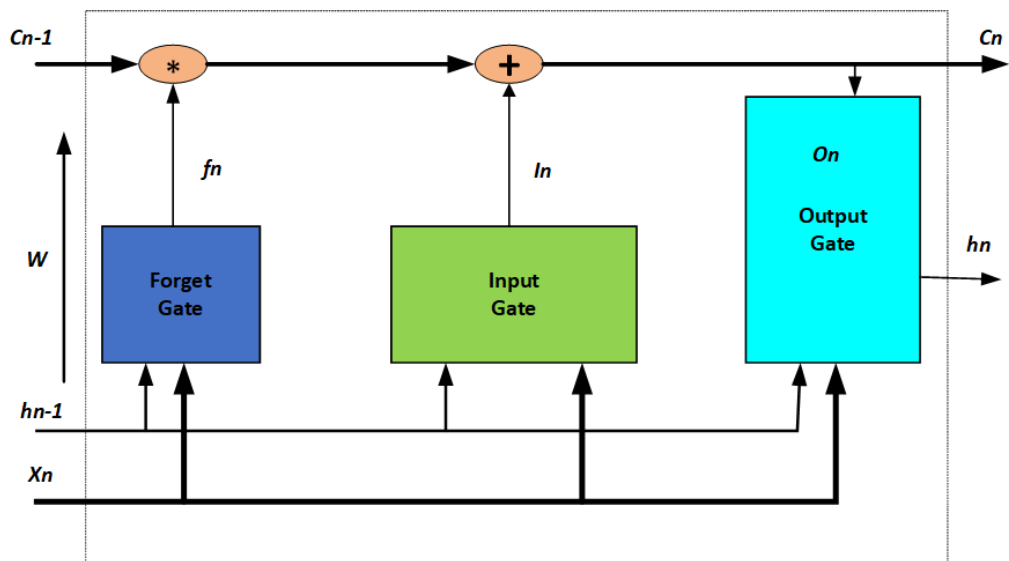


Fig. 5.3 Arquitectura de una celda de memoria LSTM

De la misma manera, en la Fig. 5.3, la salida del input gate se determina por

$$I_n = \sigma(W_i[h_{n-1}, X_n] + b_i) \quad (5.5)$$

donde  $I_t$  es la salida del input gate,  $\sigma$  es la activación sigmoïdal,  $W_i$  son los pesos encontrados en el input gate, y  $b_i$  son los bias de las neuronas del input gate.

El estado actual de la celda de memoria se encuentra realizando la siguiente operación, de acuerdo con la Fig. 5.3

$$C_n = C_{n-1} f_t + \tanh(W_{ns}[h_{n-1}, X_n] + b_{ns}) I_n \quad (5.6)$$

siendo  $C_n$  el estado actual de la celda,  $C_{n-1}$  es el estado de la celda en el tiempo anterior,  $\tanh$  es la función de activación tangente hiperbólica,  $W_{ns}$  son los pesos encontrados en el estado de la celda,  $b_{ns}$  son los bias de las neuronas del estado de la celda.

El valor actual del estado escondido se determina con:

$$h_n = \sigma(W_o[h_{n-1}, X_n] + b_o) \tanh(C_n) \quad (5.7)$$

donde  $h_n$  el valor del estado escondido,  $W_o$  son los pesos encontrados en el output gate, y  $b_o$  son los bias de las neuronas del output gate.

Siguiendo ahora con la Fig. 5.2, se puede observar que el cuadro 4 corresponde al proceso de entrenamiento y prueba de la red LSTM; el modelo de predicción a encontrar se basa los pesos  $W$  encontrados en toda la red. Estos pesos representan el comportamiento de los datos del nivel de potencia del canal de TV. Para obtener el modelo LSTM, con Phyton y librería Keras , hay que definir parámetros como los archivos de datos de entrada  $X_{PCTT}[n]$  y de salida  $Y_{PCTT}[n]$ , el número *layers* de capas del modelo, el porcentaje *dropout* de olvido de la red, el tamaño *feature* del vector de entrada y las métricas a utilizar, entre otros.

Una vez configurado el modelo LSTM, se usan los datos  $m_p[n]$  que fueron separados para el proceso de predicción tal como se muestra en el cuadro 1.2 de la Fig. 5.2. Estos datos tendrán un tratamiento similar a los datos usados para el entrenamiento y prueba del modelo; es decir, el proceso de modulación propuesto en el cuadro 5 es el mismo que el del cuadro 2. En otras palabras, la señal modulada es [86]:

$$x_p[n_c] = \cos(2\pi f_c n_c + k m_p[n]) \quad (5.8)$$

Mientras que la señal que será usada para el proceso de predicción es

$$X_{PCP}[n] = x_p[n_c] \forall (n_c = n) \quad (5.9)$$

Ya con los datos tratados, de acuerdo con el procedimiento del cuadro 6, se invoca al modelo LSTM encontrado en el cuadro 4, para obtener las predicciones de la señal modulada  $Y_{PCP}[n]$ . Esta señal es demodulada de acuerdo con el cuadro 7, obteniendo así los datos  $m_{LSTMp}[n]$ , que representan la predicción de los niveles de potencia del canal de TV, tal como se expresa en el cuadro 8.

El proceso de demodulación realizado en el cuadro 7 se representa por la expresión:

$$m_{LSTMp}[n] = \frac{\cos^{-1}(Y_{PCP}[n] + \emptyset[n]) - 2\pi f_c n}{k} \quad (5.10)$$

siendo  $\emptyset[n]$  el factor que corrige la diferencia de fase que se produce debido a que la función  $\cos^{-1}(x)$  sólo entrega valores en el intervalo  $(0, \pi)$ , y se expresa de la manera siguiente:

$$\emptyset[n] = 2\pi f_c n + k m_p[n] - \cos^{-1}(X_{PCP}[n]) \quad (5.11)$$

El *MSE* entre los valores de salida de un modelo  $m_{LSTMp}[n]$  y los valores originales de la data  $m_p[n]$  se calcula con la expresión [91]:

$$MSE = \sum_{n=1}^N \frac{(m_{LSTMp}[n] - m_p[n])^2}{N} \quad (5.12)$$

donde  $N$  es la cantidad de datos de entrada.

Por otro lado, el  $r_s$  entre los flujos de datos  $m_{LSTMp}[n]$  y  $m_p[n]$  se determina calculando:

$$r_s = \frac{N \sum m_{LSTMp}[n] m_p[n] - \sum m_{LSTMp}[n] \sum m_p[n]}{\sqrt{(N \sum (m_{LSTMp}[n])^2 - (\sum m_{LSTMp}[n])^2)(N \sum (m_p[n])^2 - (\sum m_p[n])^2)}} \quad (5.13)$$

### 5.2.3. PROCESO DE ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DEL ESPECTRO

Con los datos de predicción de niveles de potencia se procede a determinar  $Dp[n]$  la predicción de la disponibilidad del espectro del canal de TV, tal como se muestra en los cuadros 1, 1.2, y 2 de la Fig. 5.4.

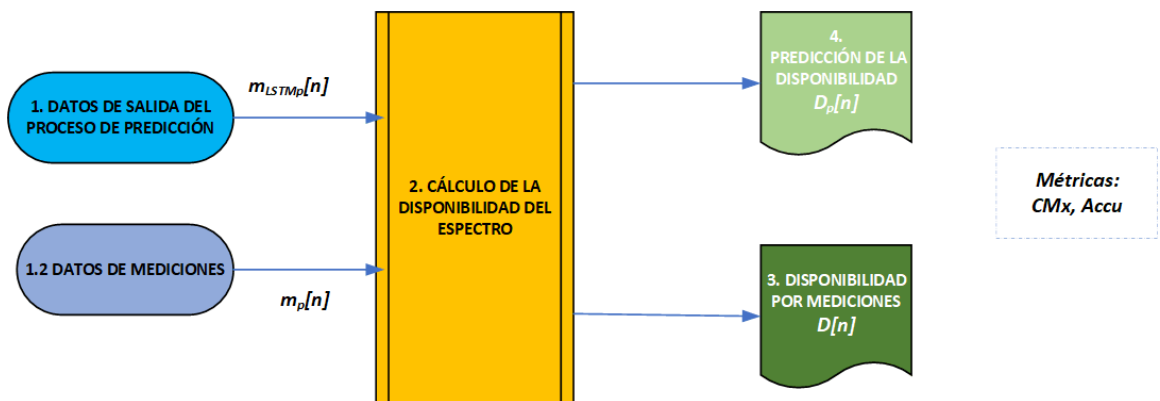


Fig. 5.4 Diagrama de flujo del proceso de predicción de disponibilidad del espectro.

Finalmente, para efectos de comparar la predicción de la disponibilidad espectral con la disponibilidad espectral de los datos usados para predicción  $D[n]$ , se realizan los procesos indicados en los cuadros 3 y 4 de la misma Fig. 5.4.

La disponibilidad espectral de los datos de medición, expresada en porcentaje, se la determina de la siguiente manera:

$$D[n] = 100 - \frac{100 \sum_{n=1}^{(Mp-feature-1)} A[n]}{Mp-feature-1} \quad (5.14)$$

en donde,

$$A[n] = \begin{cases} 0, & \text{available channel} & \text{if } m_p[n] < P_{TH} \\ 1, & \text{non available channel} & \text{if } m_p[n] \geq P_{TH} \end{cases} \quad (5.15)$$

De la misma manera se determina, expresada en porcentaje, la disponibilidad espectral de los datos de predicción:

$$D_p[n] = 100 - \frac{100 \sum_{n=1}^{(Mp-feature-1)} A_p[n]}{Mp-feature-1} \quad (5.16)$$

$$A_p[n] = \begin{cases} 0, & \text{available channel} & \text{if } m_{LSTMp}[n] < P_{TH} \\ 1, & \text{non available channel} & \text{if } m_{LSTMp}[n] \geq P_{TH} \end{cases} \quad (5.17)$$

El canal estará disponible durante el periodo de tiempo  $n$  cuando el nivel de potencia del espectro sea menor que un nivel referencial  $P_{TH}$ ; en ese caso, se le asigna el valor 0 y si el canal no está disponible se le asigna el valor 1. El error absoluto en la predicción de la disponibilidad del espectro será:

$$D_{error} = |D[n] - D_p[n]| \quad (5.18)$$

Mientras que el error relativo de la disponibilidad se obtiene de la manera siguiente:

$$D_{RE} = \frac{D_{error}}{D[n]} \quad (5.19)$$

Las métricas que servirán para evaluar resultados sobre la predicción del espectro son el error medio cuadrático ( $MSE$ ), el coeficiente de correlación

Spearman ( $r_s$ ); mientras que para la disponibilidad espectral se utilizarán: la Matriz de Confusión ( $CMx$ ), la precisión ( $Accu$ ), la probabilidad de falla  $p_f$  y la probabilidad de falsa alarma  $p_{fa}$ .

La Matriz de Confusión ( $CMx$ ) es una medida de la cantidad de aciertos y equivocaciones de los estados de disponibilidad espectral encontrados entre la disponibilidad original y la predicción de disponibilidad.

$$CMx = \begin{bmatrix} A_{0/0} & A_{0/1} \\ A_{1/0} & A_{1/1} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

Donde  $A_{0/0}$  representa la cantidad de veces que se predice el estado 0 cuando la señal real está en estado 0;  $A_{0/1}$  es el número de veces que se predice el estado 0 cuando la señal real tiene el estado 1;  $A_{1/0}$  es la cantidad de veces que se predice el estado 1 y la señal real era 0; y,  $A_{1/1}$  representa el número de veces que coinciden en el estado 1 ambas señales.

El  $Accu$  se calcula de la siguiente manera:

$$Accu = \frac{A_{0/0} + A_{1/1}}{A_{0/0} + A_{0/1} + A_{1/0} + A_{1/1}} \quad (5.21)$$

Por otro lado, a partir de la  $CMx$  se pueden determinar las probabilidades de falla  $p_f$  y de falsa alarma  $p_{fa}$ , las cuales se calculan de acuerdo con las expresiones siguientes:

$$p_f = \frac{A_{1/0}}{A_{0/0} + A_{0/1} + A_{1/0} + A_{1/1}} \quad (5.22)$$

$$p_{fa} = \frac{A_{0/1}}{A_{0/0} + A_{0/1} + A_{1/0} + A_{1/1}} \quad (5.23)$$



### 5.3. RESULTADOS

En esta sección se observará el comportamiento de la predicción con referencia a parámetros como el índice de modulación, frecuencia de portadora, coeficiente de correlación y tamaño del vector de entrada.

#### 5.3.1. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA PREDICCIÓN

La Fig. 5.5 muestra los comportamientos del coeficiente de correlación Spearman  $r_s$  entre los datos de predicción y los datos originales, respecto de la variación del índice de modulación, tanto para los datos modulados como los demodulados; tales comportamientos están parametrizados con la frecuencia de la señal portadora.

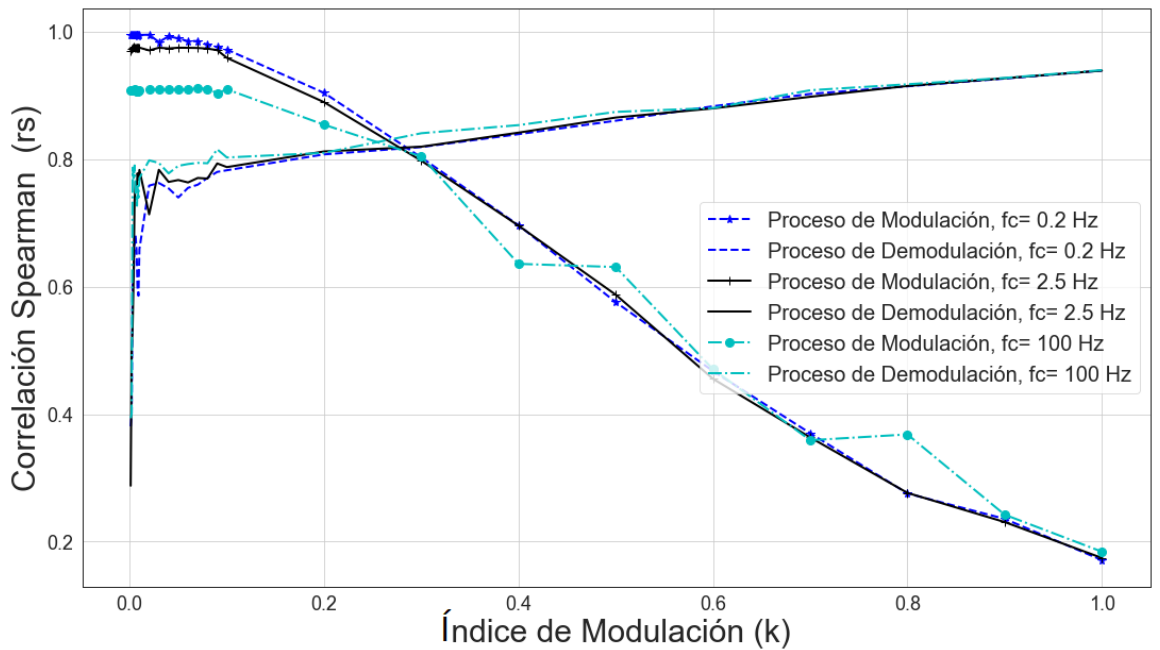


Fig. 5.5 Comportamiento del coeficiente de correlación Spearman en los datos de modulación y demodulación, en función del Índice de Modulación  $k$

En la Fig. 5.5. se pueden observar dos comportamientos diferentes de  $r_s$ , uno creciente y otro decreciente, en función del índice de modulación  $k$ . El

comportamiento decreciente de  $r_s$  se da entre los flujos de datos de la señal modulada predecida y de la señal modulada original; mientras que, el comportamiento creciente corresponde a la correlación entre los flujos de datos de la señal demodulada y los datos de nivel de potencia originales.

En otras palabras, se determinó que el índice de modulación afecta de manera directa a la predicción de la señal modulada. A medida que  $k$  aumenta, las señales moduladas de predicción y las originales divergen en su comportamiento; mientras que las señales demoduladas de predicción y la data original tienden a converger.

Se puede observar en la misma Fig. 5.5 que el comportamiento de las señales originales y las de predicción es más estable a bajas frecuencias. Por ejemplo, a una frecuencia de portadora de 2.5 Hz con  $k = 0.2$ , se obtiene  $r_s = 0.88974$  para el comportamiento de las señales moduladas de predicción y la original mientras que, entre las señales demoduladas y la data original  $r_s = 0.87670$ . Si la frecuencia de portadora aumenta a 100Hz y  $k = 0.5$  los valores de  $r_s$  cambian a 0.63093 y 0.87457 respectivamente.

Además, en la Fig. 5.5, se puede ver que en  $k = 0.285$  se interceptan las curvas crecientes y las decrecientes de  $r_s$ ; por lo que ese valor de  $k$  se utilizará para las predicciones posteriores. Por otro lado, conociendo que las muestras de los valores del nivel de potencia de cada canal de TV están espaciadas cada 7.2 s y que la frecuencia de portadora para la modulación debe cumplir con la condición del teorema de muestreo, entonces dicha frecuencia de portadora será ajustada a  $f_c = 0.33 \text{ Hz}$ , para el resto de este trabajo.

Para determinar la influencia del vector de entrada *feature* en el comportamiento del coeficiente de correlación  $r_s$  en la predicción de las señales moduladas y en la predicción espectral, se realizó un barrido del *feature*

En la Fig. 5.6 se puede observar que a medida que el *feature* se incrementa,  $r_s$  crece presentando pequeñas variaciones para el caso de las señales

moduladas; mientras que  $r_s$  presenta un lento decrecimiento para las señales demoduladas. En todo caso, se determinó que la menor diferencia entre esas dos gráficas ocurre para  $feature = 90$  muestras.

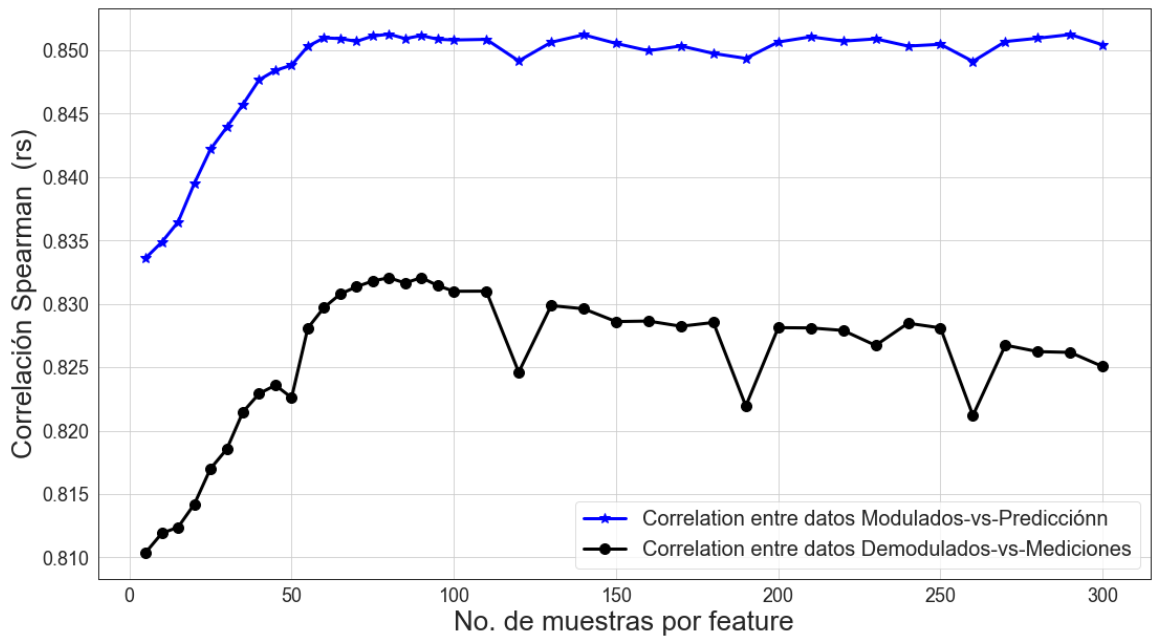


Fig. 5.6 Comportamiento del coeficiente de correlación Spearman para los datos modulados y demodulados, en función del parámetro feature

En la Tabla 5-1 se muestran los valores de los parámetros que serán utilizados para el resto del presente trabajo.

Tabla 5-1 Parámetros para predicción

$f(\text{MHz})$	$k$	feature	layers	Dropout (%)
0.33	0.385	90	500	20

### 5.3.2. PREDICCIÓN DEL ESPECTRO CON MODELO LSTM

En la Fig. 5.7 se muestra el comportamiento de la señal modulada  $x_p[n_c]$  en color rojo, mientras que la señal  $X_{PCP}[n]$ , de color azul, contiene los valores de los cambios de fase de la señal modulada.

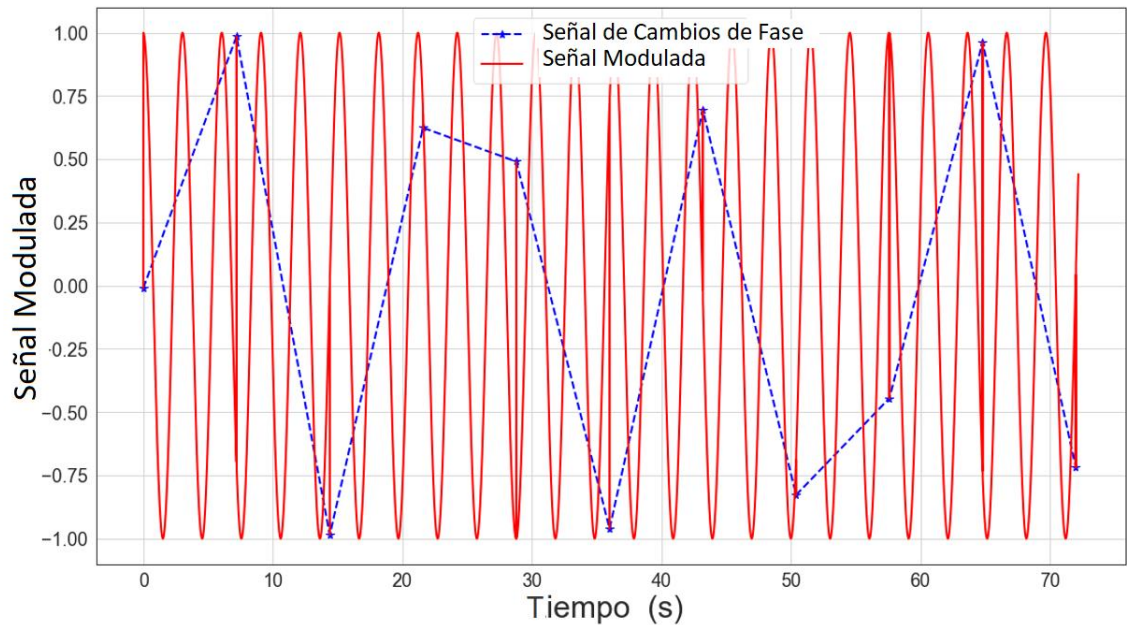


Fig. 5.7 La señal modulada antes de la predicción se muestra en color rojo. La línea azul muestra la señal que contiene exclusivamente los cambios de fase

La Fig. 5.8 en cambio muestra la comparación entre la señal de predicción del espectro  $m_{LSTMp}[n]$  y la señal de mediciones espectrales usada para la predicción  $m_p[n]$ ; las métricas de esta comparación muestran un  $MSE = 3.029$  con índice de correlación  $r_s = 0.84197$ . Estos resultados indican un nivel aceptable del proceso de predicción propuesto.

Una vez que se realizó la predicción del espectro se procede a calcular disponibilidad espectral. La disponibilidad espectral se la calculará a partir de la señal de predicción de los niveles de potencia, para compararla con la disponibilidad de los datos medidos.

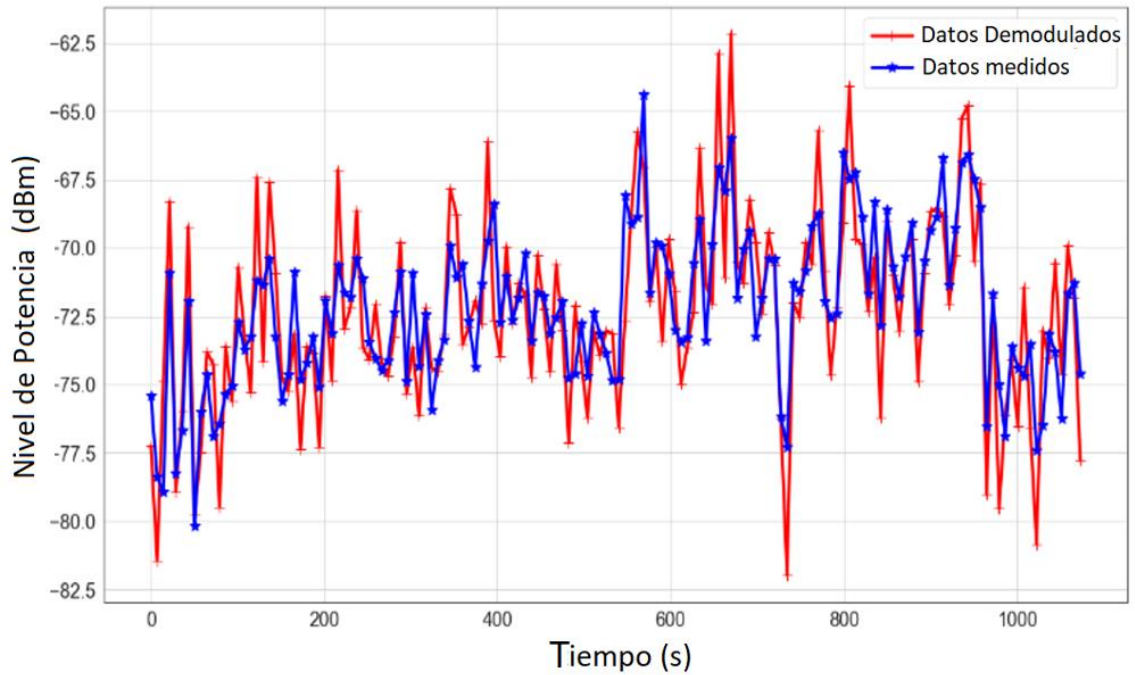


Fig. 5.8 La señal de datos de medición se muestra en color azul, mientras que los datos de predicción están en color rojo.

### 5.3.3. ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DEL ESPECTRO

La disponibilidad real del espectro  $D[n]$  en el interior del edificio fue determinada a partir de la señal de medición  $m_p[n]$ , mientras que la estimación de disponibilidad uso la señal de predicción  $m_{LSTMp}[n]$ . En la Fig. 5.9 se muestra el comportamiento de la precisión de la disponibilidad  $Accu$  y el comportamiento del error relativo  $D_{RE}$  de la diferencia entre ambas disponibilidades del espectro, respecto de la variación del umbral. Se puede ver en la Fig. 5.9 que el  $Accu$  presenta un valor mínimo de 0.821 cuando al umbral es variado entre los niveles de potencia de -80 dBm y -65 dBm.

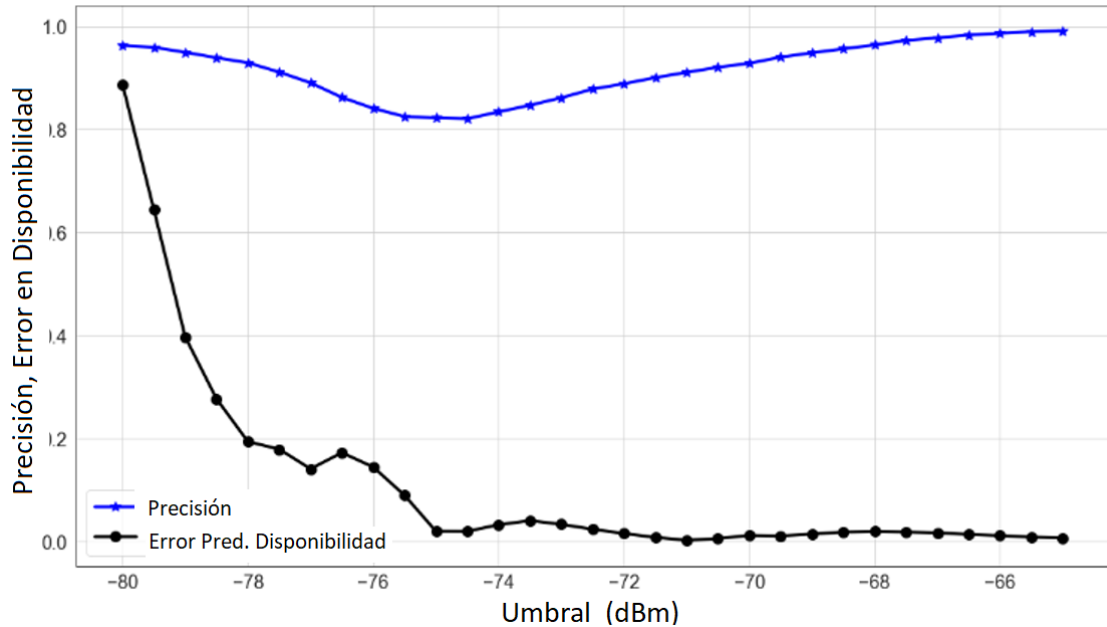


Fig. 5.9 Comportamiento de las métricas de precisión de la predicción del espectro  $Accu$ , en azul, y del error relativo de la disponibilidad  $D_{RE}$ , en color negro

Para valores del umbral menores que  $-79$  dBm, el  $Accu$  tiende a 1 porque el valor del componente  $A_{1/1}$  de la  $CMx$  tiende a ser muy dominante respecto a los otros componentes ya que la disponibilidad es baja. Así mismo, cuando el umbral toma valores mayores que  $-66$  dBm el  $Accu$  nuevamente tiende a 1 porque ahora el valor del componente  $A_{0/0}$  es el dominante debido a que la disponibilidad es alta. En (69) puede comprobarse que si  $A_{1/1}$  o  $A_{0/0}$  adquiere un valor muy dominante respecto a los otros, el  $Accu$  tiende a 1.

Por otra parte, el error relativo muestra un comportamiento diferente pues varía entre casi 1 hasta aproximadamente 0, cuando el nivel de referencia varía entre  $-80$  dBm y  $-65$  dBm. Si el umbral toma valores cercanos a  $-80$  dBm, ambas disponibilidades tienden a 0%. Debido a que los valores de disponibilidad son pequeños, el error relativo entre las disponibilidades tiende a ser grande. En cambio, si el umbral toma valores cercanos a  $-65$  dBm, las disponibilidades tienden al 100%. Ya que los valores de disponibilidad son grandes, el error relativo tiende a ser pequeño.

Los comportamientos de  $CMx$ ,  $p_f$ ,  $p_{fa}$  y  $D_{error}$  para varios tamaños de muestras  $M_p$  usando el nivel de referencia  $P_{th} = -75 \text{ dBm}$ , se presentan en la Tabla 5-2.

En la Tabla 5-2 se puede ver, analizando las matrices de confusión, que la disponibilidad espectral no se encuentra distribuida uniformemente en el conjunto de muestras; y, que los mejores resultados de disponibilidad espectral se encontraron cuando el tamaño de la muestra escogido para la predicción fue de  $M_p = 7623$ , el equivalente a unas 15 h de medición en este trabajo. En este caso, se observó además que el error entre la disponibilidad del conjunto de mediciones y la disponibilidad de los datos de predicción fue casi cero, con un  $Accu$  de 0.8328.

Adicionalmente, se observa en la misma Tabla 5-2 que el error absoluto en la predicción de la disponibilidad del espectro se mantiene entre 0.8 y 2.764; mientras que la precisión varía entre 0.7935 y 0.8328, variando de acuerdo con el tamaño de la muestra usada en la predicción. Al mismo tiempo puede verse que el valor de  $p_f$  es menor que 0.11 y que el valor de  $p_{fa}$  no sube de 0.097.

*Tabla 5-2 RESULTADOS DE LA DISPONIBILIDAD DEL ESPECTRO*

$M_p$	$D_{error}$	$CMx$	$Accu$	$p_f$	$p_{fa}$
2541	1.225	$\begin{bmatrix} 810 & 238 \\ 268 & 1134 \end{bmatrix}$	0.7935	0.1094	0.0971
5082	2.764	$\begin{bmatrix} 1031 & 353 \\ 491 & 3116 \end{bmatrix}$	0.8309	0.0984	0.0707
7623	0.8	$\begin{bmatrix} 2338 & 630 \\ 629 & 3935 \end{bmatrix}$	0.8328	0.0835	0.0836
10164	0.546	$\begin{bmatrix} 3284 & 868 \\ 923 & 4998 \end{bmatrix}$	0.8222	0.0916	0.0862

## 5.4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los estudios presentados en el Capítulo 2, se enfocan principalmente en predecir la ocupación del espectro basados en el conocimiento pasado de dicha ocupación espectral, es decir a partir de datos binarios. Varios de estos estudios reportan que, si la ocupación del espectro es muy variable, los rendimientos de sus procesos de predicción tienden a bajar.

En este sentido, se ha reportado que los canales con disponibilidad de alrededor del 50% alcanzan una precisión de hasta 91.67%, mientras que en los canales que tienen poca o mucha disponibilidad, la precisión puede disminuir hasta 25%, cuando se usa el modelo de Markov escondido. También se han usado modelos de Redes Neuronales para predicción de la disponibilidad del espectro, reportando que los errores empiezan a crecer a medida que la variabilidad de los datos empieza a subir, pero que no sobrepasan el 10%.

Los mejores resultados en predicción de disponibilidad espectral aquí reportados se han obtenido con un modelo LSTM de Deep Learning, con precisión entre 0.90 y 0.98; y con un modelo basado en Minería de Datos, que reporta una precisión entre 0.878 y 0.925.

Para la obtención de estos resultados no es necesario tener el conocimiento del histórico de la disponibilidad espectral sino solamente del histórico de los niveles de potencia en el interior del edificio. En este caso, para enfrentar a la alta variabilidad que presentan los niveles de potencia, se usa una modulación angular de la data.

Fue escogida la modulación en fase porque los cambios de fase en la señal modulada pueden ser plenamente identificados y usados. Sin embargo, la demodulación de los datos se constituyó en un desafío importante, por lo que se introdujo un factor de corrección de fase debido a que la función inversa del coseno solamente entrega valores en grados del intervalo (0, 180).



Este trabajo reporta una precisión mayor al 80% en la estimación de la disponibilidad del espectro siendo transparente la condición de variabilidad de la disponibilidad del canal. Sin embargo, en los resultados de este trabajo, al igual que en los otros trabajos reportados, influye directamente la cantidad de muestras en la data de entrada.

Construir el modelo LMTS a partir de las mediciones es el proceso que tiene más gasto temporal. La demora en este proceso es aproximadamente 1 min cuando la longitud del vector muestral de entrenamiento es de 40.800. Una vez construido el modelo LSTM, la predicción del espectro y la estimación de la disponibilidad dura alrededor de 2 s. Estos tiempos varían de acuerdo con el tipo de procesador del computador y del estado de ocupación de las memorias.

---

# CONCLUSIONES

---

En este trabajo doctoral se introduce el concepto de Disponibilidad Efectiva del espectro (ESA) para indicar que un dispositivo SR-CRWS puede operar en el interior de un edificio como un SS. Se ha caracterizado y modelado la disponibilidad de espectro en la banda de TV, diferenciando la disponibilidad espacial de la temporal y demostrando que hay un gran potencial de disponibilidad y capacidad de canal en el interior de los edificios ubicados en zonas urbanas densas.

Se ha demostrado que los sistemas con canales de ancho de banda hasta 6 MHz pueden operar con mayor oportunidad que los sistemas con ancho de banda mayores de 6 MHz, pero estos tienen una gran posibilidad de operación si lo hacen con subportadoras distribuidas. Se ha desarrollado un mecanismo de estimación de ESA al interior de edificios, sin necesidad de mediciones interiores; así mismo, se ha probado que, con el despliegue de usuarios primarios propuesto en este trabajo, no habría ESA en los dos últimos pisos de un edificio.

Se ha demostrado que los interiores de los edificios son lugares adecuados para reutilizar frecuencias, tanto espacial como temporalmente; por esta razón, los SB podrían diseñarse para obtener el ESA deseado, lo cual puede lograrse variando las alturas y distancias desde la BS del sistema primario.

Adicionalmente se desarrolló un mecanismo de predicción del espectro, basado en LSTM, donde se introdujo un proceso de modulación/demodulación en fase, para vencer al problema reportado sobre los grandes errores en la predicción con canales con alta variabilidad de disponibilidad. Se considera además, que este método logrará un ahorro temporal en las decisiones de administración de la disponibilidad del espectro en los sistemas cognitivos de corto alcance.



---

# TRABAJOS FUTUROS

---

Este trabajo deja abierto dos caminos de mejora:

El primer camino, es estimar la ESA en escenarios donde los edificios no sean homogéneos en altura; y el otro es mejorar la precisión en la predicción, de la disponibilidad espectral en el interior de edificios, probando nuevos esquemas de transformaciones no lineales.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] Y.-C. Liang, *Dynamic Spectrum Management: From Cognitive Radio to Blockchain and Artificial Intelligence*, Springer Open, 2020.
  
- [2] United Nations, «World Urbanization Prospects, The 2018 Revision,» Department of Economic and Social Affairs, NEW YORK, 2019.
  
- [3] R. Jia et al., «Design Automation for Smart Building Systems,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, nº 9, pp. 1680-1699, 2018.
  
- [4] P. Chamoso, A. González-Briones, S. RODRIGUEZ y J. M. CORCHADO, «Tendencies of Technologies and Platforms in Smart Cities: A State-of-the-Art Review,» *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, 2018.
  
- [5] D. N. Le, L. L. Tuan y M. Dang Tuan, «Smart-building management system: An Internet-of-Things (IoT) application business model in Vietnam,» *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 141, pp. 22-35, 2019.
  
- [6] CISCO, «Cisco Visual Networking Index (VNI): Complete Forecast Update, 2017-2022,» Cisco Knowledge Network (CKN), 2018.
  
- [7] Shweta Pandit y G. Singh, *Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks*, Springer International Publishing, 2017.
  
- [8] B. Hamdaoui, B. Khalfi y N. Zorba, «Dynamic Spectrum Sharing in the Age of Millimeter Wave Spectrum Access,» *IEEE Network*, vol. 1, nº 7, 2020.

- [9] F. Novillo, J. Gomez y W. Medina, «Channel Availability Characterization in TV bands for OSA devices inside buildings,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, n° 6, pp. 2592-2597, 2016.
- [10] W. Medina, J. Gómez y F. Novillo, «Evaluating channel capacity opportunities for potential use by short range devices based on OSA,» de *IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Guayaquil, 2016.
- [11] Umebayashi y M. López-Benítez, «A study on time domain deterministic-stochastic model of spectrum usage in WLAN,» de *A study on time domain deterministic-stochastic model of spectrum usage in WLAN,» de A study on time domain deterministic-stochastic model of spectrum usage in WLAN,» de IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC): Special Session Workshops*, 2018.
- [12] J. Zhang, L. Yan y Y. Chen, «Exploring Indoor White Spaces in Metropolises,» *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, vol. 9, n° 1, 2017.
- [13] Federal Communications Committee, «Mobile Broadband: The benefits of additional spectrum,» Federal Communications Committee (FCC), 2002.
- [14] T. Shimomura, T. Oyama y H. Seki, «Analysis of TV White Space Availability in Japan,» de *Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012.
- [15] J. van de Beek, J. Riihijärvi y P. Mähönen, «Intrinsic challenges (and opportunities) to deploy LTE in Europe's TV white spaces,» de *Future Network & Mobile Summit (FutureNetw)*, Berlin, 2012.
- [16] H. Song, *Spectrum Management in Dynamic Spectrum Access: A Deep Reinforcement Learning Approach*, VIRGINIA: THESIS, 2019.

- [17] E. Pietrosemoli y M. Zennaro, «Tv white spaces a pragmatic approach,» ICTP-The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013.
- [18] P. F. Marsha, *A Potential Alliance for World-Wide Dynamic Spectrum Access*, New America Foundation, Issue Brief #25, 2009.
- [19] S. Bhattarai, *Spectrum Efficiency and Security in Dynamic Spectrum Sharing*, VIRGINIA: Thesis Dissertation, 2018.
- [20] Y. Ye, *Study of Sensing Issues in Dynamic Spectrum Access*, Virginia: Thesis, 2019.
- [21] Y. Arjoun y N. Kaabouch, «" A Comprehensive Survey on Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Recent Advances, New Challenges, and Future Research Directions,» *Sensors*, vol. 19, nº 126, 2019.
- [22] E. Biglieri, A. J. Goldsmith, L. J. Greenstein y N. Mandayam, *Principles of Cognitive Radio*, New York: Cambridge University Press, 2013.
- [23] F. Awin, Y. M. Alginahi, E. Abdel-Raheem y K. Tepe, «Technical Issues on Cognitive Radio-Based Internet of Things Systems,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 97887-97908, 2019.
- [24] H. M. Almantheri, K. Al Amri, Y. A. Bahri y G. A. Rahbi, «TV White Space (TVWS) trial in Oman: Phase one (Technical),» de *2018 Sixth International Conference on Digital Information, Networking, and Wireless Communications (DINWC)*, Beirut, 2018.
- [25] J. P. Pawar y P. V. Ingole, «Dynamic spectrum access analysis in cognitive radio based wireless regional area network,» de *10th International*

*Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, Coimbatore, 2016.

- [26] I. Mustapha, M. U. Bakura, D. Mustapha y a. M. Abbagana, «A Review of TV White Space Technology And Its Deployments in Africa,» de *Arid Zone Journal Of Engineering, Technology & Environment*, Maiduguri, 2019.
- [27] W. Medina, J. Gómez, F. Novillo y J. Romero-Arguello, «Availability of adjacent TV channels inside buildings of dense urban scenarios for use of short-range devices with OSA capabilities,» de *8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, Medellin, 2016.
- [28] European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), «ECC Report 186, Technical and operational requirements for the operation of white space devices under geo-location approach,» ECC, 2013.
- [29] T. Jordbru, H. Idsoe, L. R. Cenkeramaddi, B. Beferull-Lozano y M. Hamid, «Radio measurements on a customized software defined radio module: A case study of energy detection spectrum sensing,» de *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* , Torino, 2017.
- [30] A. Arteaga y A. Navarro, «Availability of TV White Spaces Using Spectrum Occupancy Information and Coverage Maps,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, nº 6, pp. 2588-2591, 2016.
- [31] L. Yu, «Spectrum Availability Prediction for Cognitive Radio Communications: A DCG Approach,» *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 6, nº 2, pp. 476-485, 2020.



- [32] Guodong Zhao, Wei Zhang y S. Li, *Advanced Sensing Techniques for Cognitive Radio*, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- [33] L. Yu, Q. Wang, Y. Guo y P. Li, «Spectrum availability prediction in cognitive aerospace communications: A deep learning perspective,» de *Cognitive Communications for Aerospace Applications Workshop (CCAA)*, Cleveland, 2017.
- [34] S. Jain y A. Goel, «A Survey of Spectrum Prediction Techniques for Cognitive Radio Networks,» *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 12, nº 10, pp. 2196-2201, 2017.
- [35] F. Beltran, S. K. Ray y J. A. Gutierrez, «Understanding the Current Operation and Future Roles of Wireless Networks: Co-Existence, Competition and Co-Operation in the Unlicensed Spectrum Bands,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, nº 11, pp. 2829-2837, 2016.
- [36] A. B. Flores, R. E. Guerra, E. W. Knightly y P. E. a. S. Pandey, «IEEE 802.11af: a standard for TV white space spectrum sharing,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, nº 10, pp. 92-100, 2013.
- [37] A. Amich, *Efficient Spectrum Utilization Using Statistic Modeling of Channel Availability*, Guilford: Ph.D. Thesis, 2014.
- [38] V. K. Shah, S. Silvestri, S. Bhattacharjee y S. K. Das, «An Effective Dynamic Spectrum Access based Network Architecture for Smart Cities,» de *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Kansas City, 2018.
- [39] A. N. Mody, «Tutorial on White Spaces, Regulations, Standardization and Technologies, IEEE. 802.22-17-0054-Rev0,» White SpaceAlliance, 2017.

- [40] A. S. Alfa, H. Abu Ghazaleh y B. T. Maharaj, «Performance Analysis of Multi-Modal Overlay/Underlay Switching Service Levels in Cognitive Radio Networks,» *IEEE ACCESS*, vol. 7, pp. 78442-78453, 2019.
- [41] Lopez-Benitez, M. y F. Casadevall, «Empirical Time-Dimension Model of Spectrum Use Based on a Discrete-Time Markov Chain With Deterministic and Stochastic Duty Cycle Models,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, nº 6, pp. 2519-2533, 2011.
- [42] R. S. de Castro, P. Godlewski y P. Martins, «Cognitive Beacon Channel via GSM and UMTS,» de *21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Instambul, 2010.
- [43] X. Ying, J. Zhang y L. Yan, «Exploring Indoor White Spaces in Metropolises,» de *MOBICOM'13*, Miami, 2013.
- [44] L. Bedogni, «Dynamic Adaptive Video Streaming on Heterogeneous TVWS and Wi-Fi Networks,» *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 25, nº 6, pp. 3253-3266, 2017.
- [45] Y. Yang, L. Shi y J. Zander, «On the capacity of Wi-Fi System in TV white space with aggregate interference constraint,» de *8th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks*, Washington , 2013.
- [46] C. Rosa, M. Kuusela, F. Frederiksen y K. I. Pedersen, «Standalone LTE in Unlicensed Spectrum: Radio Challenges, Solutions, and Performance of MulteFire,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, nº 10, pp. 170-177, 2018.
- [47] Y. Loong Lee<sup>1</sup>, W. Kadhim Saad, A. Abd El-Saleh y M. Ismail, «Improved Detection Performance of Cognitive Radio Networks in AWGN and

Rayleigh Fading Environments,» *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 11, n<sup>o</sup> June, pp. 437-446, 2013.

- [48] A. A. Lysko y L. Mfupe, «Geolocation Spectrum Database - Based TV Spectrum Availability Predictions versus Measurements for Verulam, South Africa: Overview,» de *13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, 2019.
  
- [49] M. H. Khan y P. Barman, «TV White Space in Rural Broadband Connectivity in Case of Bangladesh toward “Vision 2021”,» *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 7, n<sup>o</sup> 3, pp. 36-45, 2018.
  
- [50] S. Muhammad-Hashir, S. Erkucuk y T. Baykas, «A Novel Indoor Channel Model for TVWS Communications Based on Measurements,» de *2018 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Paris, 2018.
  
- [51] M. Heggo, X. Zhu, S. Sun y Y. Huang, «A cognitive TV white space-broadband power line MIMO system for indoor communication networks,» *Journal of the Franklin Institute*, vol. 355, n<sup>o</sup> 11, p. 4755–4770, 2018.
  
- [52] W. Medina, F. Novillo, E. Chancay y J. Romero-Arguello, «Characterizing Effective Spectral Opportunities and Shadowing Influence Inside Large Buildings for Short Range CRWS Use,» de *IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, Salvador, 2019.
  
- [53] W. Medina, F. Novillo, E. Chancay y J. Romero-Arguello, «Discovering Shadowing Effects Over Effective Spectrum Availability Inside Smart Buildings for Cognitive Short Range Systems Operation,» de *IEEE 40th Sarnoff Symposium*, Newark, 2019.

- [54] A. Oluwaranti y S. Okegbile, «Two state Markov chain based predictive model for cognitive Radio spectrum availability: A conceptual approach,» de *Future Technologies Conference (FTC)*, San Francisco, 2016.
- [55] Z. Jianli, W. Mingwei y Y. Jinsha, «Based on neural network spectrum prediction of cognitive radio,» de *International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, Ningbo, 2011.
- [56] P. Huang, C. Liu, X. Yang, L. Xiao y J. Chen, «Wireless Spectrum Occupancy Prediction Based on Partial Periodic Pattern Mining,» *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, nº 7, pp. 1925-1934, 2014.
- [57] C. Wu, Y. Cheng, Y. Gong, G. Ding, L. Yu y Z. Zhang, «A Method Based on Frequent Pattern Mining to Predict Spectral Availability of HF,» de *IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, Chongqing, 2018.
- [58] A. Agarwal, A. S. S. y R. Gangopadhyay, «Spectrum Occupancy Prediction for Realistic Traffic Scenarios: Time Series versus Learning-based Models,» *Journal of Communications and Information Networks*, 2018.
- [59] G. Lin, Y. Cheng y H. Jiang, «A HMM-Based Spectrum Access Method Used for HF Communication,» de *8th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, Hangzhou, 2015.
- [60] Y. Shi y Y. E. Sagduyu, «Spectrum learning and access for cognitive satellite communications under jamming,» de *IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*, Philadelphia, 2016.
- [61] I. A. M. Balapuwaduge, F. Y. Li y V. Pla, «System Times and Channel Availability for Secondary Transmissions in CRNs: A Dependability-

Theory-Based Analysis,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, n° 3, pp. 2771-2788, 2017.

- [62] S. DasMahapatra, S. Patnaik, S. N. Sharan y M. Gupta, «Performance Analysis of Prediction Based Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks,» de *International Conference on Intelligent Communication and Computational Techniques (ICCT)*, Jaipur, 2019.
  
- [63] J. Salas, F. d. B. Vidal y F. Martinez-Trinidad, «Deep Learning: Current State,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, n° 12, pp. 1925-1945, 2019.
  
- [64] C. Valdivieso, F. Novillo, J. Gomez y D. Dick, «Centralized Channel Assignment Algorithm for WSN Based on Simulated Annealing in Dense Urban Scenarios,» de *8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, Medellin, 2016.
  
- [65] C. Valdivieso, F. Novillo, A. Amat y A. Núñez-Unda, «Heuristic Channel Assignment Mechanism for WSN in Congested ISM Bands Based on QoS,» *International Journal of Electrical and Electronic Engineering, & Telecommunications (IJEETC)*, 2020.
  
- [66] FCC Spectrum Policy Task Force, «Report of the spectrum efficiency working group,» FCC Spectrum Policy Task Force, Washington, 2002.
  
- [67] L. Ho y H. Gacanin, «Design Principles for Ultra-dense Wi-Fi deployments,» de *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. , Barcelona, 2018.
  
- [68] F. Awin, E. Abdel-Raheem y K. Tepe, «Blind Spectrum Sensing Approaches for Interweaved Cognitive Radio System: A Tutorial and Short Course,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, n° 1, pp. 238-259, 2019.

- [69] C. Balint, A. DeSabata, P. Bechet y S. Miclaus, «Joint Spectrum Availability Measurement in the 4.5-10.5 MHz HF band,» de *14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, Oradea, 2017.
- [70] M. Nayak, U. Bhanja, D. Parida, D. Dash y K. D. Sa, «A Real Time Implementation of Spectrum Sensing System Using Software Defined Radio,» de *International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, Kannur, 2017.
- [71] ITU, «RECOMMENDATION ITU-R BT.2033-1,» ITU-R, 2015.
- [72] ATSC, «ATSC Recommended Practice:Receiver Performance Guidelines,» Advanced Television Systems Committee, Inc., Washington, 2010.
- [73] Industry Canada, «Technical Standards and Requirements for Radio Apparatus Capable of Receiving Television Broadcasting,» Spectrum Management and Telecommunications Broadcasting Equipment Technical Standard, 2008.
- [74] ITU, «RECOMMENDATION ITU-R BT.804,» ITU-R, 1992.
- [75] European Commission, «COST Action 231, Digital mobile radio Towards future generation systems: Final Report,» European Commission, EUR (Series), Ginebra, 1999.
- [76] European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), «ERC Recommendation 70-03, Relating to the use of Short Range Devices (SRD),» ECC, 2020.

- [77] S. Haykin, *Digital Communication Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [78] S. Miller y D. Childers, *Probability and Random Processes with Applications to Signal Processing and Engineering*, San Diego: Elsevier, 2012.
- [79] M. L. Benítez, *Spectrum Usage Models for the Analysis, Design and Simulation of Cognitive Radio Networks*, Barcelona: PhD Thesis, 2011.
- [80] Kishor Patil, Knud Skouby y R. Prasad, «Spectrum Occupancy Information in Support of Adaptive Spectrum Sensing for Cognitive Radio,» *Network Protocols and Algorithms*, vol. 6, nº 1, pp. 76-86, 2014.
- [81] L. Korowajczuk, *LTE, WIMAX AND WLAN NETWORK DESIGN, OPTIMIZATION AND PERFORMANCE ANALYSIS*, Reston: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [82] Ramon Agusti, Francisco Bernardo, Fernando Casadevall, Ramon Ferrus, Jordi Perez-Romero y O. Sallent, *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*, Barcelona: Fundación Vodafone España, 2010.
- [83] GSMA Public Policy Position, «5G Spectrum,» GSMA, U.K., 2020.
- [84] FCC Spectrum Policy Task Force, «Report of the Spectrum Rights and Responsibilities Working Group,» GSMA, 2002.
- [85] J. J. Egli, «Radio Propagation above 40 MC over Irregular Terrain,» *Proceedings of the IRE*, vol. 45, nº 10, pp. 1383-1391, 1957.

- [86] S. Saunders y A. Aragón-Zavala, *Antennas And Propagation For Wireless Communication Systems*, Chichester: JohnWiley & Sons Lt, 2007.
- [87] J. Van de Beek, J. Riihijarvi y A. Achtzehn, «TV white Space in Europe.,» *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, nº 2, pp. 178-188, 2012.
- [88] E. Pietrosemoli y M. Zennaro, *TV white spaces a pragmatic approach*, ICTP-The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013.
- [89] J. Brownlee, *Long Short-Term Memory Networks With Python*, Jason Brownlee, 2017.
- [90] J. G. Proakis y S. M, *Communication Systems Engineering*, New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 2002.
- [91] F. Chollet, *Deep Learning with Python*, New York: Manning Publications Co, 2017.
- [92] S. Hochreiter y J. Schmidhuber, «Long Short-Term Memory,» *Neural Computation* , vol. 9, nº 8, pp. 1735-1780, 1997.
- [93] H. V. H. G. L. a. S. J. X. H. Le, «Application of Long Short-Term Memory (LSTM) Neural Network for Flood Forecasting,» *Water Journal*, vol. 11, nº 1387, 2009.
- [94] H. Mazar, *Radio Spectrum Management: Policies, Regulations and Techniques,,* Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2016.



- [95] W. Lemstra, «Cognitive Radio Defying Spectrum Management,» Brussels, 2008.
- [96] M. S. Iacobucci, Reconfigurable Radio Systems: Network Architectures And Standards, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [97] R. Katz, «A 2017 Assessment of the Current & Future Economic Value of Unlicensed Spectrum in the United States,» Telecom Advisory Services, LLC, 2018.
- [98] D. Hemalatha y U. & Padma, «Development of power and bandwidth allocation algorithm for DSA system by particle filtering method,» de *IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2017.
- [99] L. Berlemann y S. Mangold, Cognitive Radio and Dynamic Spectrum Access, CHICHESTER: , John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [100] M. Matin, Spectrum Access and Management for Cognitive Radio Networks, BRUNEI: Springer+Business Media Singapore Pte Ltd, 2017.
- [101] M. Ibnkahla, Wireless Sensor Networks: A Cognitive Perspective, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [102] A. Mauwa, M. Bagula, E. Zennaro, A. Pietrosevoli, L. T. y X. Brown, «Systematic analysis of geo-location and spectrum sensing as access methods to TV white space,» de *2016 ITU Kaleidoscope: ICTs for a Sustainable World (ITU WT)*,, Bangkok, 2016.

- [103] L. M. K. A. A. L. L. P. a. M. V. M. T. Masonta, «Network performance analysis of the Limpopo TV white space (TVWS) trial network,» de *AFRICON 2015*, Addis Ababa, 2015.
- [104] L. Bedogni, A. Trotta y M. DiFelice, «On 3-dimensional spectrum sharing for TV white and Gray Space networks,» de *IEEE 16th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Boston, 2015.
- [105] L. Fuhr, P. Ewing y S. Forge, «Chapter 11: Shared spectrum for industrial wireless sensors,» de *Industrial Wireless Sensor Networks*, Oak Ridge, Elsevier Ltd., 2016.
- [106] F. Granelli y a. et, «Standardization and research in cognitive and dynamic spectrum access networks: IEEE SCC41 efforts and other activities,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, nº 1, pp. 71-79, 2010.
- [107] E. Hossain, D. Niyato y Z. Han, *Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks*, Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [108] J. Wilmoth, «World Urbanization Prospects: The 2018 Revision,» Press Brief, 2018.
- [109] Demographia, «Demographia World Urban Areas 15th Annual Edition,» Demographia, 2019.
- [110] A. Sharifi, «A critical review of selected smart city assessment tools and indicator sets,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 233, p. 1269–1283, 2019.

- [111] M. M. Kassem, M. K. Marina y O. Holland, «On the potential of TVWS spectrum to enable a low cost middle mile network infrastructure,» de *10th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)*, Bengaluru, 2018.
- [112] O. Miquel y M. Sudip, «Motivation for TV white space: An explorative study on Africa for achieving the rural broadband gap,» de *2nd. Europe - Middle East - North African Regional Conference of the International Telecommunications Society (ITS)*, CALGARY, 2019.

---

# ANEXO 1: CÓDIGO DEL MECANISMO DE ESTIMACIÓN DE ESA (MATLAB)

---

```
% Disponibilidad versus número de pisos
% Descripción:
% El programa calcula
% la disponibilidad que tienen edificios de diferentes
% alturas a una distancia fija.
% Number of building
start=0;
stop=100;
step=10;
% Matrix of building
WS=zeros((stop/step),100);

%Parameter of simulation
distance=5000;
h_Bs=800;
PTx=37;
model=1;
%Calculating availability WS -
count=1;
for h_PBs=600:50:800
ptr=1;
for floor=start:step:stop
if floor>=1
Temp=City(h_PBs,PTx,635,20,100,[20 20 floor],[1 1],[distance 0],model,[90 95],-87);
for i=1:Temp.nh(3)
for j=1:length(Temp.Zone)
if Temp.Zone(j,6)==i && Temp.Zone(j,8)==0 && Temp.Zone(j,9)==0
WS(ptr,i)=WS(ptr,i)+1;
end
end
WS(ptr,i)=(WS(ptr,i)/(length(Temp.Zone)/Temp.nh(3)))*100;
end
clear Temp;
ptr=ptr+1;
end
end
for i=1:10
ESA(count,i)=sum(WS(i,:))/(i*10);
end
count=count+1;
WS=zeros((stop/step),100);
end
```

```

%Matriz
%Columna 1 ---- Position x
%Columna 2 ---- Position y
%Columna 3 ---- Height of building
%Columna 4 ---- Position Habitaculo x
%Columna 5 ---- Position Habitaculo y
%Columna 6 ---- Number of Floor
%Columna 7 ---- Number of Building
%Columna 8 ---- Condition 1
%Columna 9 ---- Condition 2
%Columna 10 ---- Condition 3
classdef City<handle
properties
HTx=0; % Altura de transmisor
PTx=0; % Potencia de BS
f=0; % Frecuencia de operaci3n
ws=0 % width of street
wf=0 % width of floor
mdl=0; % model of propagation
Bs=[0 0] % distance to City from Base Station
nB=[0 0] % number of building
nh=[0 0 0] %number of habitaculo
shw=[];
S=0;
Zone
Map
end
methods
function obj = City(HTx,PTx,f,ws,wf,nh,nB,Bs,mdl,shw,S)
obj.HTx=HTx;
obj.PTx=PTx;
obj.f=f;
obj.ws=ws;
obj.Bs=Bs;
obj.nh=nh;
obj.nB=nB;
obj.wf=wf;
obj.mdl=mdl;
obj.shw=shw;
obj.S=S;
obj.Zone=zeros(obj.nh(1)^2*obj.nh(3)*obj.nB(1)^2,5);
obj.Map=zeros(2,5,obj.nB(1)*obj.nB(2));
setup(obj);
end
function setup(obj)
Blt=Building(obj.nh,obj.wf);
M=NPW(obj.nh(2));
h=0;
edif=0;
Lp=zeros(1,4);

```

```

for i=1:obj.nB(1) %Number of Building x
for j=1:obj.nB(2) %Number of Building y
edif=edif+1;
for c=1:obj.nh(3) % Floor of Building
for b=1:obj.nh(2) % Habitaculo y
for a=1:obj.nh(1) % Habitaculo x
h=h+1;
%Posiciona cada habitaculo
obj.Zone(h,1) = Blt.Floor(a,b,c).class(1)+((obj.wf+obj.ws)*(i-1))+obj.Bs(1);
obj.Zone(h,2) = Blt.Floor(a,b,c).class(2)+((obj.wf+obj.ws)*(j-1))+obj.Bs(2);
obj.Zone(h,3) = Blt.Floor(a,b,c).class(3);
obj.Zone(h,4) = b;%i
obj.Zone(h,5) = a;%j
obj.Zone(h,6) = c;%floor
obj.Zone(h,7) = edif;
obj.Zone(h,10) = M(b,a);
%Calculo de Potencia
%Ls=zeros(1,obj.nh(3));
    [Rx_C1,BP]=PRx(obj.HTx,obj.PTx,obj.f,obj.Zone(h,1),obj.Zone(h,2),obj.Zone(h,3),obj.Zone(h,
    4),obj.Zone(h,5),obj.Zone(h,6),obj.wf,obj.nh(1),obj.nh(3),obj.Bs,obj.mdl);
    Rx_C2=PRx_indoor(obj.Zone(h,1),obj.Zone(h,2),obj.Zone(h,3),obj.Bs(1),obj.Bs(2),a,b,c,700,o
    bj.nh(3),obj.wf,M);
obj.Zone(h,11)=Rx_C1;
obj.Zone(h,12)=Rx_C2;
obj.Zone(h,15)=BP(1);
obj.Zone(h,16)=BP(2);
obj.Zone(h,17)=BP(3);
obj.Zone(h,18)=BP(4);
obj.Zone(h,19)=BP(5);
obj.Zone(h,20)=BP(6);
obj.Zone(h,21)=BP(7);
obj.Zone(h,22)=BP(8);
obj.Zone(h,23)=BP(9);
obj.Zone(h,24)=BP(10);
obj.Zone(h,25)=BP(11);
obj.Zone(h,26)=BP(12);
obj.Zone(h,27)=BP(13);
obj.Zone(h,28)=BP(14);
obj.Zone(h,29)=BP(15);
%Determinar WS - Condition 1
%obj.Zone(h,8)=BS_SU(Rx_C1);
if Rx_C1>obj.S %dBm
obj.Zone(h,8)=1;
else
obj.Zone(h,8)=0;
end
%Determinar WS - Condition 2
%obj.Zone(h,9)=SU_CPE(Rx_C2);% OJO PUSE ESTA LINEA
if Rx_C2>obj.S %dBm
obj.Zone(h,9)=1;

```

```

else
obj.Zone(h,9)=0;
end
% Marco Azul del piso
if a==1&&b==1&&c==1
[obj.Map(1,.,edif),obj.Map(2,.,edif)]=Plane(obj.wf,obj.nh);
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end
function P_CPE=PRx_indoor(x,y,z,dx,dy,a,b,c,f,nf,wf,M)
% x [m] posición x
% y [m] posición y
% z [m] posición z
% dx [m] distancia Bs a x
% dy [m] distancia Bs a y
% c piso actual
% f [MHz] frecuencia de operación
% nf numero de pisos
% nh numero de habitaculos
PTx=0; % [dB] -- Potencia del Transmisor
Gt=1;Gr=1; % [dBi] -- Ganancia Tx,Rx
kw2=0
%Distancia entre CPE -> SU
zc=4*nf+2; %2m de altura para la antena de techo
xc=dx+(wf/2);
yc=dy+(wf/2);
D=sqrt((xc-x)^2+(yc-y)^2+(zc-z)^2);
%Number of penetrated walls of type [<10cm >10cm]
kw1=M(a,b);
Kw=[kw1 kw2];
%Numero de pisos atravesados
Kf=nf-c+1;
Lp=L_indoor(Kw,Kf,f,D);
P_CPE=PTx+Gt-Lp+Gr+30;
End

```

---

## ANEXO 2: CÓDIGOS DEL MECANISMO DE PREDICCIÓN DE ESA (PYTHON)

---

```
#Parámetros de entrada
wd=1;#ancho de la ventana de predicción
inp=0.285;#factor de modulación
indim=1/inp; #inverso del factor de modulación
fcent=0.33; #frecuencia de portadora 0.33
feature = 90; #Parámetro para predicción, cada 'feature' datos predice 'wd' salidas
#Lectura de datos de potencia de señal
pd.set_option('display.float_format', lambda x: '%.4f' % x)
df=pd.read_csv('DATA.csv', delimiter=';')
#Se escoje canal para predicción
rssi=df.CH3.values
#eSTADISTICA para Limitar datos aberrantes.
CANAL='CH3'
plt.figure(figsize=(14,6))
df[CANAL].hist(bins=50)
plt.title('Potencia Distribution');
#Se limitan valores a media+-3.5*varianza
media_data=np.mean(rssi, axis = None);
#print(media_data);
std_data=np.std(rssi, axis = None);
#print(std_data)
max_data=media_data+3.5*std_data
min_data=media_data-3.5*std_data
rssi1=rssi
for i in range (len(rssi)):
if rssi[i]>max_data:
rssi1[i]=max_data
if rssi[i]<min_data:
rssi1[i]=min_data
#dividiendo la data para entrenamiento, pruebas y predicciones
spec_size1= int(len(rssi1) * 0.20)# 0.20 tamaño datos para predicción
dataset_model =len(rssi1)-spec_size1 #tamaño datos para entrenamiento y prueba
print(dataset_model, spec_size1)
#limitando el archivo de modulacion
mdt=rssi1[spec_size1:]; #mdt=rssi1[spec_size1:]
mdt = np.reshape(mdt, (-1, 1));#formando el arreglo
print(mdt.shape)
print(spec_size1)
# definiendo el tiempo
t=np.arange(0,len(rssi1)*8,7.2);#realizando intervalos de 7.2 seg
t1=np.arange(0,len(t)*8,0.01);#realizando intervalos de 0.01 seg
## modulando
```



```

import math
from decimal import *
#señal modulada=cos(angulo); angulo=argum+fidt
fidt=[];
fidt=(inp*mdt);#fase modulante
argum=[]
argum=np.pi*2*fcent*t1[spec_size1*800:];#fase de portadora
argum=argum.reshape(-1,1);#formando arreglo
argum_m=[]
argum_m=np.pi*2*fcent*t[spec_size1:spec_size1+dataset_model];#muestreo de fase por cada
    muestra de señal modulante
argum_m=argum_m.reshape(-1,1);#formando arreglo
fase=[];#angulo=argum+fidt
fase=fidt+argum_m;
y_2=[]
y_1=[]
for i in range(len(t1)-1-spec_size1*800):
y_2.append(np.cos(argum[i]))# señal portadora
for i in range(dataset_model):#len(t)-spec_size1-1
y_1.append(np.cos(fase[i]))# señal modulada
from array import array
import numpy as np
y_1=np.asarray(y_1)
y_2=np.asarray(y_2)
#Define tamaño de archivo para entrenamiento y pruebas
#y_1=np.asarray(y_1)
dataset = y_1#valores de la señal modulada
dataset = dataset.astype('float32')
dataset = np.reshape(dataset, (-1, 1)) #lo convierte en un vector 1D
scaler = MinMaxScaler(feature_range=(-1, 1)) # función para normalizar
dataset = scaler.fit_transform(dataset) # normaliza los datos
train_size = int(dataset_model* 0.80) #toma el 80% de los datos para entrenamiento
test_size = dataset_model - train_size #deja el 20% de datos para pruebas
#spectrum=dataset[0:spec_size,:];#archivo para predicción
train, test = dataset[:train_size,:], dataset[train_size:train_size+test_size,:] # asigna datos
#Función para crear archivos de entrenamiento y prueba
#ft : features to train
#wd : size of window
def create_dataset(dataset, ft,wd):
X, Y = [], []
for i in range(len(dataset)-ft-1):
a = dataset[i:(i+ft),0]
X.append(a)
b = dataset[(i+ft):(i+ft+wd),0]
Y.append(b)
return np.array(X), np.array(Y)
#Creando entradas y salidas para entrenamiento y pruebas
X_train, Y_train = create_dataset(train, feature,wd);#entradas y salidas para entrenamiento
X_test, Y_test = create_dataset(test, feature,wd);#entradas y salidas para pruebas
X_train= np.array(X_train);#formando arreglo

```

```

X_test=np.array(X_test);#formando arreglo
X_train = np.reshape(X_train, (X_train.shape[0], 1, X_train.shape[1]));#formando archivo 3D
X_test = np.reshape(X_test, (X_test.shape[0], 1, X_test.shape[1]));#formando archivo 3D
#Modelo LSTM, aprendizaje y pruebas
b_siz=64 ####
model = Sequential()
model.add(LSTM(500, input_shape=(X_train.shape[1], X_train.shape[2])))
model.add(Dropout(0.2))
model.add(Dense(1))
model.compile(loss='mean_squared_error', optimizer='sgd', metrics=['accuracy'])
epocas_model=20
history = model.fit(X_train, Y_train, epochs=epocas_model, batch_size=b_siz,
                    validation_data=(X_test, Y_test),
                    callbacks=[EarlyStopping(monitor='val_loss', patience=10)], verbose=1, shuffle=False)
model.summary()
#Preparando la predicción
spec_size= int(len(rssi1) * 0.20)# tamaño datos para predicción
spectrum=rssi1[:spec_size];# Define datos para predicción
spectrum = np.reshape(spectrum, (-1, 1));#formando el arreglo
#scaler = MinMaxScaler(feature_range=(-1, 1)) # funcion para normalizar
#spectrum = scaler.fit_transform(spectrum) # normaliza los datos
#Modulacion de nuevos datos
fidt_p=[];
fidt_p=(inp*spectrum);#fase modulante
argum_p=[]
argum_p=np.pi*2*fcent*t1[:spec_size*800];#fase de portadora
argum_p=argum_p.reshape(-1,1);#formando arreglo
argum_mp=[]
argum_mp=np.pi*2*fcent*t[:spec_size];#muestreo de fase por cada muestra de señal
modulante
argum_mp=argum_mp.reshape(-1,1);#formando arreglo
fase_p=[];#angulo=argum+fidt
fase_p=fidt_p+argum_mp;
y_2p=[]
y_1p=[]
for i in range(len(spectrum)*800):
y_2p.append(np.cos(argum_p[i]))# señal portadora
for i in range(len(spectrum)):
y_1p.append(np.cos(fase_p[i]))# señal modulada
from array import array
import numpy as np
y_1p=np.asarray(y_1p)
y_2p=np.asarray(y_2p)
#Calcula correccion de fase
fase_equiv=[]
corrige_fase=[]
for i in range(len (spectrum)):
fase_equiv.append(np.arccos(y_1p[i]))
corrige_fase.append(fase_p[i]-fase_equiv[i])
fase_equiv=np.asarray(fase_equiv)

```

```

corrige_fase=np.asarray(corrige_fase)
#Tratamiento de datos para la predicción
argum1=[]
corrige_fase=[]
for i in range(spec_size):
argum1.append(argum_mp[i])
argum1=np.asarray(argum1)
X_new1, argum2 = create_dataset(argum1, feature,wd)
Xnew2,fhase2= create_dataset(fase_p,feature,wd)
X_phase,corrige_fase=create_dataset(corrige_fase,feature,wd)
argum2=argum2.reshape(-1,1);#formando arreglo
fhase2=fhase2.reshape(-1,1);#formando arreglo
corrige_fase=corrige_fase.reshape(-1,1)
fase_1=[]
equiv1=[]
equiv2=[]
ffw1=[]
ffw2=[]
ffw3=[]
#Hacer las predicciones DE LA SEÑAL MODULADA para nuevos datos
y_1p = scaler.fit_transform(y_1p) # normaliza los datos
X_new, Y_new = create_dataset(y_1p,feature,wd) # create dataset
X_new = np.reshape(X_new, (X_new.shape[0], 1, X_new.shape[1])) #Features to model
#Y_new=Y_new.reshape(len(Y_new),1) # Adjust the output
#Y_new=repair_set(Y_new,wd)
Y_predict = model.predict(X_new) #Generate Prediction
#Y_predict=Y_predict.reshape(len(Y_predict),1) #Adjust prediction
from sklearn.metrics import mean_squared_error
error_pred=mean_squared_error(Y_new,Y_predict);
#correccion de fase
fase_pred=[]
for i in range (len(Y_predict)):
fase_pred.append(np.arccos(Y_predict[i]))
fase_corregida=[]
for i in range (len(Y_predict)):
    fase_corregida.append(fase_pred[i]+corrige_fase[i])#fase_corregida.append(fase_pred[i]+cor
    rigefase[i])
#fase_corregida.append(fase_pred[i])
#Demodulacion de la predicción
fidt_1=[]
mdt_1=[]
for i in range (len(Y_predict)):
fidt_1.append((fase_corregida[i]-argum2[i]))
mdt_1.append(fidt_1[i]*indim) #señal demodulada
#Función para calcular disponibilidad
def disponibilidad(dataset,th):
predict=[]
predict_val=0
for i in range(len(dataset)):
if dataset[i]<th:

```

```
predict.append(0);
predict_val+=1
else:
predict.append(1);
return predict, predict_val
#calculando disponibilidad
th=-75 #-75
mdt_orig_disp=mdt_orig[:] #limitando muestras
mdt_1_disp=mdt_1[:] #limitando muestras
X_orig,Xd_orig= disponibilidad(mdt_orig_disp, th)
Y_pr,Yd_pr= disponibilidad(mdt_1_disp, th)
```