Proyecto Final de Carrera Ingeniería Superior de Telecomunicaciones

Medidas para la construcción de un REM (Radio Environment Map) de TVWS en la mitad sur del Área Metropolitana de Barcelona

Measurements for building a TVWS Radio Environment Map of the southern metropolitan área of Barcelona

Autor: Gustavo Herraiz Montes

Directora: Anna Umbert Juliana

Marzo 2016

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN DEL PROYECTO

Las compañías de comunicaciones móviles y su gran expansión han provocado un gran incremento en la demanda del espectro radioeléctrico, el cual está prácticamente todo asignado. Debido a su gran escasez se han buscado soluciones para poder hacer un uso más eficiente del mismo. Múltiples campañas de medidas sobre la ocupación del espectro han demostrado que existen muchos intervalos del mismo en desuso.

La solución más firme en la actualidad está basada en aprovechar huecos en el espectro, también conocidos como White Spaces. Mediante tecnologías de acceso cognitivo se pretende conseguir hacer un uso secundario del espectro siempre y cuando no se perjudique a los usuarios primarios. Debido a su carácter prácticamente estático, sus buenas condiciones de propagación, y la reducción experimentada con el paso de analógico a digital, la banda de televisión (470-862MHz) se presenta como una de las mejores candidatas para implantar estos sistemas de acceso cognitivo.

El gran reto que se le presenta a este tipo de tecnología reside en saber que zonas del espectro están realmente en desuso y por tanto son zonas válidas para ubicar usuarios secundarios. Un Radio Environment Map (REM) es una base de datos que incluye información del espectro radioeléctrico con el objetivo de poder determinar la ocupación del espectro en cada punto geográfico.

En el proyecto actual se ha llevado a cabo una campaña de medidas en la zona sur del Área Metropolitana de Barcelona (AMB) con el objetivo de después de haber procesado los resultados obtenidos construir un REM, que en un futuro no muy lejano, ayude en la implementación de la tecnología Cognitive Radio en el área metropolitana de Barcelona.

RESUM DEL PROJECTE

Les companyies de comunicacions mòbils i la seva gran expansió han provocat un gran increment en la demanda de l'espectre radioelèctric, que es troba ja pràcticament assignat en la seva totalitat. Degut a aquesta escassetat, s'han cercat solucions per poder fer un ús més eficient de l'espectre. Diverses campanyes de mesures sobre l'ocupació de l'espectre han demostrat que existeixen molts intervals en desús.

Actualment la solució amb més força es basa en aprofitar els forats en l'espectre, també coneguts com a White Spaces. Per mitjà de tecnologies d'accés cognitiu es pretén aconseguir fer un ús secundari de l'espectre sempre vigilant no perjudicar als usuaris primaris. Degut al caràcter pràcticament estàtic, les bones condicions de propagació, i la reducció experimentada amb el pas d'analògic a digital, la banda de televisió (470-862MHz) es presenta com una de les millors candidates per implantar aquests sistemes d'accés cognitiu.

El gran repte que es presenta a aquest tipus de tecnologia es troba en saber quines zones de l'espectre es troben realment en desús i per tant són zones aptes per ubicar usuaris secundaris. Per saber l'ocupació de l'espectre tenim el Radio Environment Map (REM), es tracta d'una base de dades que inclou informació del espectre radioelèctric amb l'objectiu de poder determinar l'ocupació de l'espectre en cada punt geogràfic tal com hem comentat inicialment.

En aquest projecte s'ha dut a terme una campanya de mesures a la zona sud de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB) amb l'objectiu de construir un REM un cop processats els resultats obtinguts. La intenció és que en un futur no gaire llunyà aquest REM ajudi a la implementació de la tecnologia Cognitive Ràdio a l'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB).

ABSTRACT

The huge expansion that mobile telecommunications companies experimented caused a large increase in demand for radio spectrum. Due to its great shortage we have the necessity of using it more effectively. Over the last years, a considerable amount of campaigns have been run and proven that the radio spectrum is inefficiently used.

The currently best solution consists on using the holes, also known as White Spaces, which are located all over the spectrum. By using cognitive access technologies, the spectrum could be used not only by primary users but also by secondary users as long as there are no conflicts between both of them. Since the digital TV band is the most static one it´s the best candidate in which we can test the cognitive access systems.

The biggest challenge these technologies have is knowing which areas of the spectrum are truly free and can be used by secondary users. A Radio Environment Map (REM) is a data base that contains enough information about the radio spectrum to know the free slots at every geographical area.

In the current essay, we ran a measurements campaign in the southern part of Barcelona´s Metropolitan Area (AMB) with the future goal of building a REM. Once built, this REM will help implementing the Cognitive Radio technology in Barcelona´s Metropolitan Area.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Introducción 11
1.1. Objetivo 12
1.2. Alcance 12
2. Estado del Arte 14
2.1. Introducción a Cognitive Radio 14
2.1.1. La escasez del espectro radioeléctrico 14
2.1.2. Cognitive Radio 14
2.1.3. El Ciclo Cognitivo 16
2.1.4. Arquitectura de una red Cognitive Radio 18
2.1.5. Aplicaciones de Cognitive Radio 19
2.2. Cognitive radio y la TDT 21
2.3. Transición TV analógica y digital 22
2.3.1. TDT en Cataluña 22
2.4. TV White Spaces 25
2.4.1. Detección de TVWS 25
2.5. El Dividendo Digital 28
2.6. Impacto del Dividendo Digital en la economía 29
3. Instrumentación y estudio previo 31
3.1. Desglose del equipo de montaje 31
3.2. Estudios previos 33
3.2.1. Estudio sobre la atenuación y el preamplificador del analizador 33
3.2.2. Impacto del número de trazas y de barridos 34
3.2.3. Medidas outdoor Campus Nord 36
3.2.4. Estudios complementarios 41
4. Planificación y procedimiento de medición 46
4.1. La zona de estudio 46
4.2. Planificación de las medidas 47
5. Procesado y análisis de los resultados 54
5.1. Procesado de datos 54
5.2. Resultados teóricos 54
5.3. Resultados empíricos 56

5.4. Análisis de canales no oficiales 61
5.4.1. Canales ocupados en todos los puntos 61
5.4.2. Canales ocupados en algunos puntos medidos 62
5.5. Tabla resumen de canales no oficiales 65
6. Conclusiones 66
7. Referencias 68
7.1. Referencias complementarias 69

1. Introducción

El creciente aumento de las comunicaciones móviles y el desarrollo de nuevas tecnologías que utilizan el medio radioeléctrico en los últimos años han derivado en que los sistemas que pretenden usar este medio para transmitir se encuentren con una escasez de frecuencias libres.

El espectro radioeléctrico es un recurso limitado y que está sometido, en general, a unas estrictas reglas para poder transmitir. Mejoras en la codificación y modulación de la señal como puede ser el paso a la Televisión Digital Terrestre, que ha permitido transmitir 4 canales donde solo antes se podía transmitir 1, no ha evitado que los estudios más recientes hayan concluido en que el espectro está infrautilizado. Esta baja eficiencia en el uso del espectro es lo que ha originado que se busquen alternativas para que los nuevos servicios que se puedan ofrecer en un futuro tengan cabida en el espectro y todos los usuarios se puedan beneficiar de ellos. En este contexto se plantea un nuevo modelo de acceso al medio conocido como Acceso Dinámico del Espectro y la creación de redes de radio cognitiva basadas en este modelo, que permitirán hacer un uso más eficiente del espectro dando acceso al medio a usuarios secundarios sin perjudicar las emisiones de los usuarios primarios.

Una forma muy útil de conocer el entorno radioeléctrico, sin necesidad de estar realizando medidas constantemente es un REM (Radio Environment Map). Un REM es una base de datos que nos permite conocer la ocupación espectral en un punto geográfico cualquiera.

En el proyecto actual se ha llevado a cabo una campaña de medidas en la banda de televisión, comprendida entre los 470 y los 862 MHz que serán necesarias para la futura construcción de un REM de la ciudad de Barcelona. La zona en cuestión donde se han realizado las medidas ha sido en la parte sud del Área Metropolitana de Barcelona (AMB). Se ha seleccionado la banda de televisión entre las muchas posibles debido a que su carácter estático y las buenas condiciones de

propagación que presentan las frecuencias que comprende la convierten en la candidata idónea para el desarrollo de futuros sistemas de radio cognitiva.

El presente documento está estructurado en 6 partes. En primer lugar se realiza una breve introducción al proyecto que se expone a continuación, explicando tanto el objetivo como el alcance del estudio realizado. En segundo lugar se presenta el marco referencial, con el objetivo de contextualizar al lector con el trabajo que se mostrara en apartados posteriores. En tercer lugar se explica la instrumentación utilizada para realizar las medidas y se explican las primeras campañas previas que se realizaron con el fin de familiarizarse con los instrumentos. En cuarto lugar se explica la planificación y ejecución de la campaña de medidas realizada en la región sud del Área Metropolitana de Barcelona. En quinto lugar se muestra el procesado de los datos obtenidos y su posterior análisis. Por último se exponen las conclusiones que hemos podido extraer y las líneas futuras de investigación.

1.1. Objetivo

El objetivo del presente proyecto ha sido realizar una campaña de medidas de los 49 canales de la banda de televisión en la zona sud del Área Metropolitana de Barcelona (AMB) que serán necesarias para la futura creación de un REM del Área Metropolitana de Barcelona. El compañero proyectista Pedro Delicado se encarga de la zona norte de la misma AMB.

1.2. Alcance

Las tareas realizadas durante este proyecto han sido las siguientes:

- Análisis de la situación actual de la televisión digital en el área de estudio, así como también de los aspectos teóricos de la tecnología Cognitive Radio.

- Creación y modificación de varios scripts con la herramienta MATLAB tanto como para configurar el analizador de espectro como para poder procesar los resultados a posteriori.
- Estudio previo en medidas outdoor comparándolo con medidas previas indoor en dos escenarios distintos. Diferentes alturas y diferentes separaciones de la pared.
- Realización de la campaña de medidas en los municipios de la región sud del Área Metropolitana de Barcelona.
- Procesado de los resultados obtenidos y comparación con los resultados teóricos.
- Elaboración de la presente memoria donde se recoge toda la documentación necesaria para la comprensión del proyecto.

2. Estado del Arte

En este capítulo se pretende contextualizar al lector sobre lo que son y cómo funcionan los sistemas de radio Cognitiva y cuáles pueden ser sus futuras aplicaciones. Nos centraremos en la situación del espectro televisivo en el momento de realización de este proyecto en 2014, la cual nos ha llevado a realizar el estudio.

2.1. Introducción a Cognitive Radio

2.1.1. La escasez del espectro radioeléctrico

En la actualidad, el espectro radioeléctrico sigue unas leyes de asignación estáticas, es decir, el gobierno da licencias a usuarios por largos periodos de tiempo en una región geográfica de gran tamaño. Con el aumento de servicios que necesitan hacer uso del espectro ha aumentado también la demanda del mismo, lo que ha provocado que haya una escasez de bandas de frecuencia para poder transmitir. Pese a que todo el espectro está asignado, no se le saca el máximo partido, o lo que es lo mismo, está infrautilizado [1]. Para resolver este problema, aparecen en el panorama actual las tecnologías de acceso dinámico al espectro radioeléctrico.

2.1.2. Cognitive Radio

Las técnicas de Cognitive Radio ofrecen la capacidad de coexistencia entre usuarios con licencia, también denominados usuarios primarios, y usuarios sin licencia o secundarios de forma óptima. En Cognitive Radio, las redes y los nodos inalámbricos tienen la capacidad de cambiar tanto los parámetros de transmisión como de recepción para proporcionar servicio a los usuarios

secundarios de forma eficiente sin interferir con los usuarios autorizados. Se pueden extraer de esta definición sus dos principales características:

- Capacidad Cognitiva: Entendemos por este concepto la capacidad que tienen las redes de Cognitive Radio, en tiempo real, de encontrar la zona del espectro óptima en la que introducir a un usuario secundario sin que este vaya a perjudicar al resto de usuarios que ya estén transmitiendo en esa zona del espectro. Se denomina "spectrum hole" a la zona del espectro temporalmente en desuso de la cual se va a beneficiar un usuario secundario. En la figura 1 podemos ver como los "spectrum holes" van variando con el tiempo dependiendo de la transmisión de los usuarios primarios.

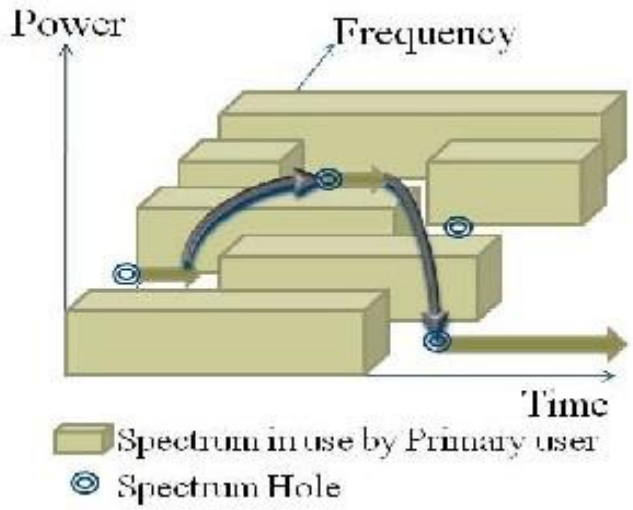


Figura 1. SPECTRUM HOLES

- Reconfigurabilidad: Entendemos por reconfigurable la capacidad que tienen los dispositivos de Radio Cognitiva de cambiar sus parámetros para poder transmitir y recibir en varias frecuencias, utilizando diferentes tecnologías de acceso al medio. Se puede seleccionar la mejor banda espectral y los parámetros de transmisión más apropiados en cada momento y reconfigurarse.

2.1.3. El Ciclo Cognitivo

Las posibilidades de la radio cognitiva van más allá del análisis y la selección de opciones técnicas en el instante. Es factible para la radio cognitiva corregir su elección primera y elegir una nueva configuración para proporcionar el mismo servicio. La figura 2 presenta esta capacidad en la que constantemente se enriquece la comunicación con los mejores parámetros posibles.

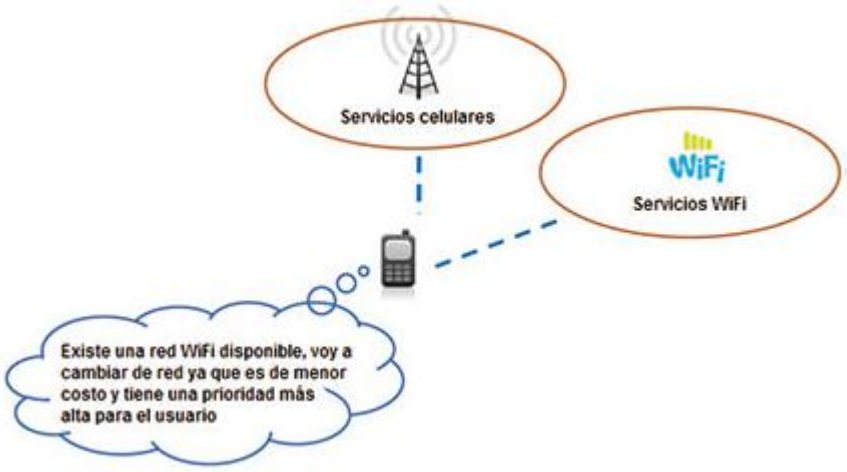


Figura 2. ELECCIÓN DE RED

A este constante proceso de mejorar la comunicación se le conoce con el nombre de Ciclo Cognitivo. Éste conjunta y entrelaza cuatro grandes funciones que se llevan a cabo tanto en forma secuencial como simultánea, tal como se muestra en la figura 3.

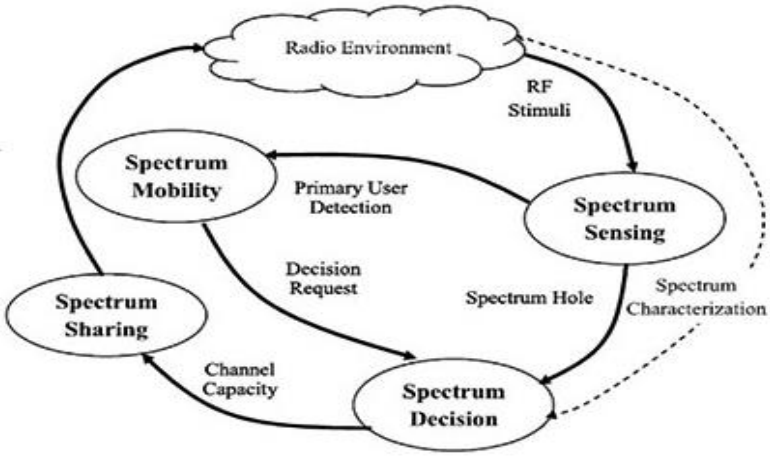


Figura 3. FUNCIONES COGNITIVE RADIO

Se lista en primer lugar la designada como Spectrum Sensing, cuya función es detectar la banda de frecuencia del espectro más adecuada para proveer el servicio solicitado de acuerdo con las condiciones y el entorno en el que se produce la solicitud. Seguidamente aparece la función Spectrum Decision, la cual a partir de la información proporcionada por Spectrum Sensing, es capaz de determinar la mejor banda frecuencial para ofrecer el servicio solicitado con una calidad idónea. En tercer lugar tenemos la función Spectrum Mobility, la principal función de Cognitive Radio, la cual nos ofrece un aprovechamiento dinámico del espectro radioeléctrico, ofreciendo siempre la mejor banda de frecuencia disponible a la vez que se proporciona una conexión transparente durante el proceso con el objetivo de no suponer ningún impedimento a otros usuarios. Finalmente, la función Spectrum Sharing, la cual se desarrolla con el objetivo de proporcionar un repartimiento equitativo del espectro a la vez que eliminar las interferencias.

Vistas estas 4 funciones, vemos que Cognitive Radio tiene las siguientes grandes ventajas:

1- Accesibilidad: Al basarse en la comunicación entre el usuario, el cual indica sus necesidades, y la radio cognitiva, que ofrece los servicios que hay disponibles y presenta las opciones idóneas para cada situación, se refuerza el acceso a las redes y servicios. Con un solo dispositivo el usuario para acceder a distintas redes y disfrutar de diferentes servicios, reduciendo mucho el coste de las cuatro funciones previamente explicadas.
2- Facilidad de uso: Puesto que el dispositivo conoce las prioridades y necesidades del usuario, puede liberar al mismo de muchas acciones manuales haciendo más eficiente el proceso de acceso y el suministro de los servicios.
3- Adaptabilidad: Las terminales se adaptan a las localizaciones geográficas, lo que propicia que cuando el usuario cambia de localidad, el dispositivo realiza un reajuste para adaptarse a la nueva

ubicación. Gracias a este reajuste el usuario no causara problemas en su nueva zona geográfica.

4- Uso eficiente del espectro: El hecho de poder escoger tanto la banda de frecuencia como los distintos parámetros para la transmisión otorga un uso eficiente del espectro.

2.1.4. Arquitectura de una red Cognitive Radio

Podemos apreciar los componentes de una red ad-hoc de Cognitive radio en la figura 4.

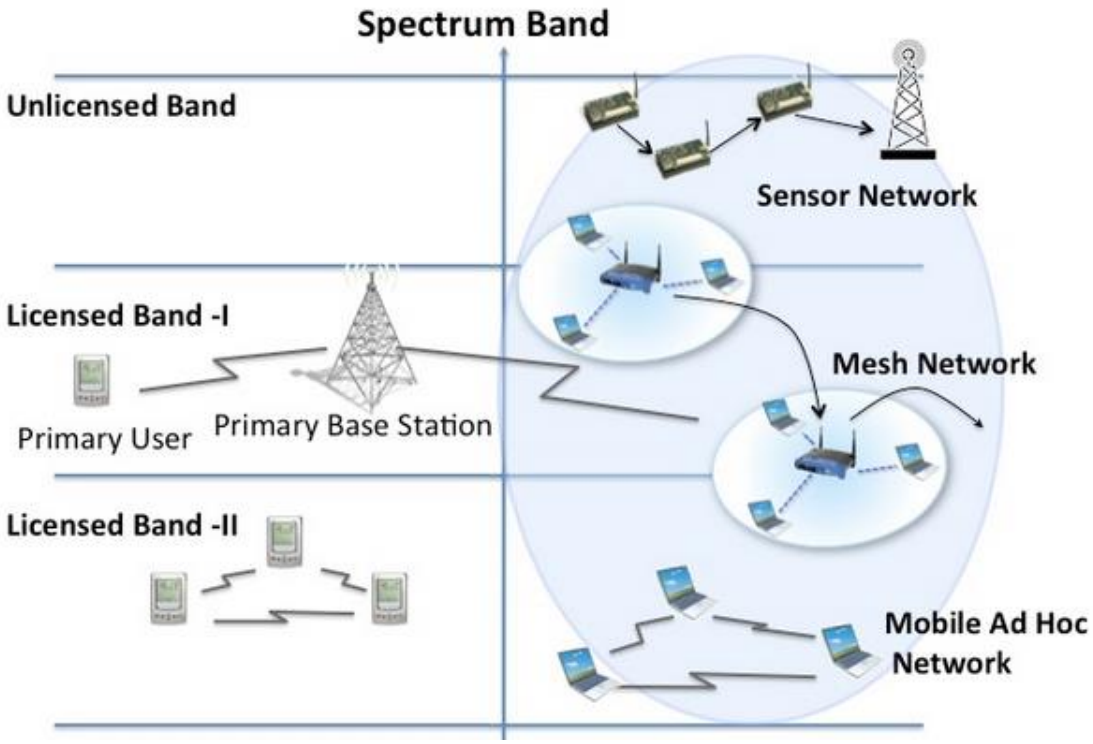


Figura 4. COMPONENTES DE UNA RED AD-HOC DE COGNITIVE RADIO

Estos se pueden clasificar en dos grupos: Red primaria y los componentes de la red de Cognitive Radio, los que a su vez se pueden componer de distintos tipos de redes como por ejemplo redes Wireless o redes Ad-hoc móviles.

2.1.4.1. Red primaria

Nos referimos mediante este término a la red existente en la que los usuarios primarios tienen licencia para operar en una determinada banda espectral. Las operaciones de los usuarios primarios son controladas por las estaciones base primarias y dada su prioridad no se deberían ver afectadas por los usuarios secundarios.

2.1.4.2. Red Cognitive Radio o red secundaria

Esta red no tiene licencia para operar en ninguna banda y por tanto se requiere una funcionalidad especial para que los usuarios de esta red puedan compartir los recursos que pertenecen a los usuarios de la red primaria. Los usuarios de Cognitive Radio son móviles y se pueden comunicar entre ellos sea cual sea la banda en la que estén operando. Sin embargo, carecen de la posibilidad de comunicarse con los usuarios primarios y por tanto dependen de la observación del entorno mientras están operando para que en el hipotético caso que un usuario con licencia quisiese hacer uso de los recursos que él está utilizando dejarlos libres.

2.1.5. Aplicaciones de Cognitive Radio

Existen varios enfoques en cuanto al ámbito de las posibles aplicaciones de Cognitive Radio, pero debido a que la regulación y estandarización de esta tecnología se encuentran todavía en desarrollo, es posible que surjan otras potenciales aplicaciones. Hoy por hoy, cabe destacar sus prometedoras cualidades en las áreas descritas a continuación:

2.1.5.1. Militar

El ejército, especialmente en los países desarrollados del primer mundo, es un gran usuario de sistemas inalámbricos, y por consiguiente ocupa una gran parte del espectro. La logística militar incluye sistemas de geolocalización, aéreo navegación, radar, sensores de distintos tipos etc. La característica en común de todos estos sistemas es que dependen del acceso a frecuencias de radio.

La mayoría de estos sistemas deben desplegarse con la mayor brevedad posible en entornos desconocidos y potencialmente hostiles, pudiendo surgir problemas tanto de conectividad como de interferencias. También están expuestos a variaciones impredecibles en el ancho de banda.

Cognitive Radio se presenta como una posible solución para estas condiciones. Una red de estos dispositivos facilitaría el despliegue en zonas desconocidas en la que puede existir una mezcla de redes cognitivas y no cognitivas. Las técnicas de acceso dinámico son una buena solución para hacer uso del espectro disponible y para convivir, o no ser detectado en este caso, por los usuarios primarios, que pueden ser de las fuerzas armadas rivales.

2.1.5.2. Seguridad pública

Podríamos ver este ámbito como uno similar al militar. Se requiere un rápido despliegue de los sistemas, inmediata disponibilidad, capacidad de operación entre varios sistemas (policía, bomberos, médicos…), variaciones en las necesidades del ancho de banda etc.

Una vez desplegada toda la infraestructura será posible usar todas las frecuencias que no estén siendo utilizadas para fines de emergencia. Los ambientes que propicien interferencias en las radiocomunicaciones son el mayor impedimento para este tipo de

sistemas; Por ejemplo, los entornos con estructuras altas de acero y hormigón como pueden ser los bloques de pisos o los entornos subterráneos como parkings, ambos muy comunes en desastres naturales.

2.1.5.3. Comercial

En el ámbito comercial existen muchas oportunidades para las radios cognitivas de brindar varios servicios inalámbricos de interés al poder moverse entre las diferentes bandas de frecuencia como para mejorar los servicios ya existentes. Destaca entre muchos otros el servicio de banda ancha en zonas rurales o de difícil acceso.

2.2. Cognitive radio y la TDT

Podemos decir que uno de los rasgos que mejor define Cognitive Radio es la búsqueda de spectrum holes a lo largo del espectro con el fin de poder dar servicio a usuarios sin licencia.

Asimismo, hemos visto que una vez empezada la transmisión es posible que un usuario con licencia para operar en la banda de frecuencia en la que nos encontramos solicite hacer uso de la misma. En ese caso, mediante la función spectrum mobility, se deberá trasladar al usuario secundario a otro hueco espectral donde pueda seguir transmitiendo. Este hecho puede ocurrir más o menos asiduamente dependiendo de la banda espectral en la que nos ubiquemos. Por ejemplo, en la banda de telefonía móvil será mucho más frecuente este evento debido a la corta duración tanto de las transmisiones como del tiempo que está desocupado el canal. Por el contrario, la banda de frecuencia en la que encontramos la televisión será mucho más estable en este sentido ya que las transmisiones son por lo general constantes durante las 24 horas del día.

2.3. Transición TV analógica y digital

Una de las invenciones más importantes del siglo XX, los sistemas analógicos de radiodifusión y de televisión, han dado paso en los últimos años al surgimiento de la radiodifusión digital. Ya ha empezado la migración de las técnicas analógicas a las digitales y el ámbito de la televisión no es una excepción.

Gracias a las técnicas de compresión de la información y del paso analógico digital, se ha producido una reducción en el ancho de banda necesario para transmitir TV hasta el punto de que donde antes solo podía emitir un canal ahora pueden llegar a emitir hasta 6. Esto ha propiciado que en el espectro originalmente pensado para emitir TV, el cual comprende de los 47MHz a los 68MHz en la banda VHF y de los 470MHz a los 862MHz en la banda UHF, ahora queden muchas bandas libres.

En el conjunto de Europa, no siendo España una excepción, se ha utilizado el estándar DVB-T para la implantación de la televisión digital. Sus principales características son las siguientes [2]:

- 3 opciones de modulación (QPSK, 16QAM, 64QAM).
- 5 tipos de tasas FED (forward error correction) diferentes.
- 4 posibilidades diferentes del intervalo de guarda para evitar la interferencia intersimbólica.
- Posibilidad de escoger entre portadoras de 2k y 8k.
- Posibilidad de operar con 6,7 y 8MHz de ancho de banda de canal (En España los canales son de 8 MHz)

2.3.1. TDT en Cataluña

En la página web de la Generalitat de Catalunya [3] y del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio podemos encontrar información sobre cómo se realizó el despliegue de la televisión digital incluyendo datos sobre la

cobertura, los centros transmisores o los canales. A estos últimos los podemos clasificar en 3 tipos distintos:

2.3.1.1. Canales Estatales

Los canales Estatales son los comunes en la gran mayoría de la geografía española. Son un total de 9 y su canal de emisión es el mismo independientemente de la ubicación geográfica en la que nos encontremos.

A cada canal de 8MHz se le denomina múltiple y está compuesto por 4 canales de televisión multiplexados. En la tabla 1 se muestra el nombre de los múltiples, el canal en el que emiten y las frecuencia inicial y final de los mismos.

Múltiple	Canal	Frecuencia inicial (MHz)	Frecuencia final (MHz)
RGE	64	814	822
SFN	66	830	838
SFN	67	838	846
SFN	68	846	854
SFN	69	854	862
RGE2	31	550	558
MPE1	47	678	686
MPE2	27	518	526
MPE3	34	574	582

Tabla 1. TABLA RESUMEN MÚLTIPLES, CANALES Y FRECUENCIAS CANALES ESTATALES

2.3.1.2. Canales Autonómicos

En Cataluña se han asignado tres múltiples de ámbito autonómico, dos de ellos para la televisión pública y uno para la privada. Estos

múltiples son variantes en función del municipio en el que nos encontremos.

A continuación, en la tabla 2 se muestran los datos de los múltiples autonómicos en la provincia de Barcelona.

Múltiple	Canal	Frecuencia inicial (MHz)	Frecuencia final (MHz)
Privado	33	566	574
Público1	44	654	662
Público2	61	790	798

Tabla 2. TABLA RESUMEN MÚLTIPLES, CANALES Y FRECUENCIAS CANALES AUTONÓMICOS

2.3.1.3. Canales Locales

Los canales locales son los que funcionan a nivel comarcal. Según en la comarca en la que nos encontremos podremos ver ocupados ciertos canales que estarán desocupados en las comarcas vecinas. En la tabla 3 se muestran los canales locales para la provincia de Barcelona y se detalla en qué provincia y que canal transmiten.

Ubicación	Múltiple	Canal
Barcelona	TL01B	26
Granollers	TL02B	40
Cornellá	TL03B	53
Igualada	TL04B	37
Manresa	TL05B	49
Mataró	TL06B	24
Sabadell	TL07B	39
Vic	TL08B	50
Vilanova i la Geltru	TL09B	30
Barcelona	TL10B	48
Cornella Llobregat 2	TL11B	46
Sabadell 2	TL12B	45

Tabla 3. TABLA RESUMEN MÚLTIPLES, CANALES Y FRECUENCIAS CANALES LOCALES

Durante las rutas que realizaremos por la zona Sud del Área Metropolitana de Barcelona esperamos encontrar ocupados en algún momento los canales locales de Cornellá. Sin embargo, es poco probable que encontremos el canal 50 ocupado puesto que es una transmisión que procede de Vic, la cual dista en 70 Km de la ciudad de Barcelona.

2.4. TV White Spaces

La transición de la televisión analógica a la digital ha facilitado que donde antes podía transmitir un solo canal ahora puedan hacerlo como mínimo cuatro, provocando así la aparición de huecos vacíos en el espectro. Estos huecos reciben el nombre de TV White Spaces (TVWS), ya que los encontramos en la banda destinada a la televisión, y son donde pueden operar los dispositivos de Cognitive Radio dando servicio a usuarios sin afectar a las transmisiones de televisión que se puedan estar produciendo en canales adyacentes.

2.4.1. Detección de TVWS

La transmisión de usuarios secundarios en la banda de televisión se fundamenta en la capacidad de los dispositivos de Cognitive Radio de detectar los TV White Spaces disponibles en cada momento. Además se deberá garantizar la no interferencia con los usuarios primarios, para ello, la FCC y la Ofcom consideran 3 posibles métodos [4] para garantizar que los dispositivos de Cognitive Radio no generen interferencias: “Beacons”, geolocalización con acceso a base de datos y “sensing”. Actualmente, la segunda opción es la que tiene más enteros a corto plazo para la detección y la cancelación de interferencias. A

continuación se explican más extensamente cada una de las tres aproximaciones:

2.4.1.1. Beacons

Mediante este método, los usuarios secundarios solo empezaran su transmisión cuando haya recibido una señal de control (beacon) que les facilite los canales disponibles en su zona. Esta señal de control se puede recibir de estaciones de televisión, estaciones de FM broadcasting o por transmisores fijos en la banda de televisión sin licencia. El problema de este método es que se requiere de una infraestructura, lo que implica un mantenimiento, normalmente por parte de terceros, convirtiéndose en un método costoso. Asimismo, las señales beacon se pueden perder por problemas similares al esquema del terminal oculto, donde los usuarios finales no tienen visibilidad directa entre ellos.

2.4.1.2. Geolocalización con base de datos

En este método, cada dispositivo determina su ubicación geográfica y a partir de este dato acceden a una base de datos para comprobar la lista de canales disponibles en esa localización. Este sistema tiene tres grandes inconvenientes:

- Necesidad de una tercera entidad encargada de construir y mantener la base de datos.
- Los dispositivos necesitan conocer o ser capaces de determinar su ubicación geográfica con un mínimo de precisión.
- Problemas de penetración a través de obstáculos para cuando el dispositivo se encuentra en un entorno indoor.

Basándose en una configuración master-slave, se consiguen superar estos tres problemas ya que el master está permanentemente conectado a internet y puede consultar la base de datos en todo momento. Por tanto, periódicamente va enviando a los slaves información sobre los TVWS disponibles en su zona geográfica.

2.4.1.3. Sensing

En este método, los usuarios sin licencia son autónomos, es decir, ellos mismos se encargan de escanear el medio y determinar que canales están libres y por tanto pueden usar. Este método también está sujeto al problema del terminal oculto, expresado de forma gráfica en la siguiente figura 5.

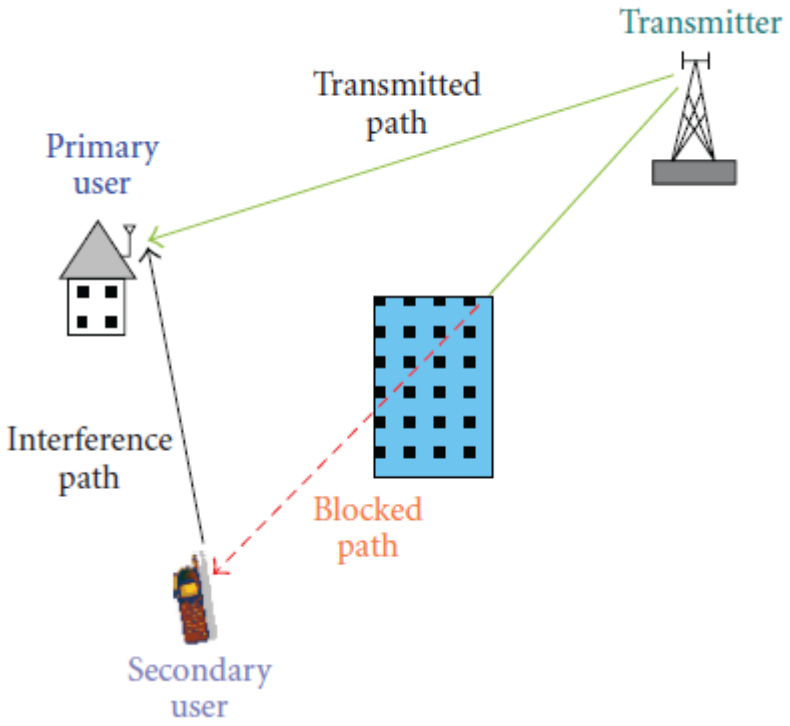


Figura 5. PROBLEMA DEL TERMINAL OCULTO

2.5. El Dividendo Digital

Dentro del gran número de servicios que necesitan hacer uso del espectro radioeléctrico destaca en la última década el de la telefonía móvil, en parte por la llegada del 3G y más recientemente del 4G.[5] Para poder adaptarnos a las necesidades actuales se necesita ampliar la capacidad del espectro destinada a

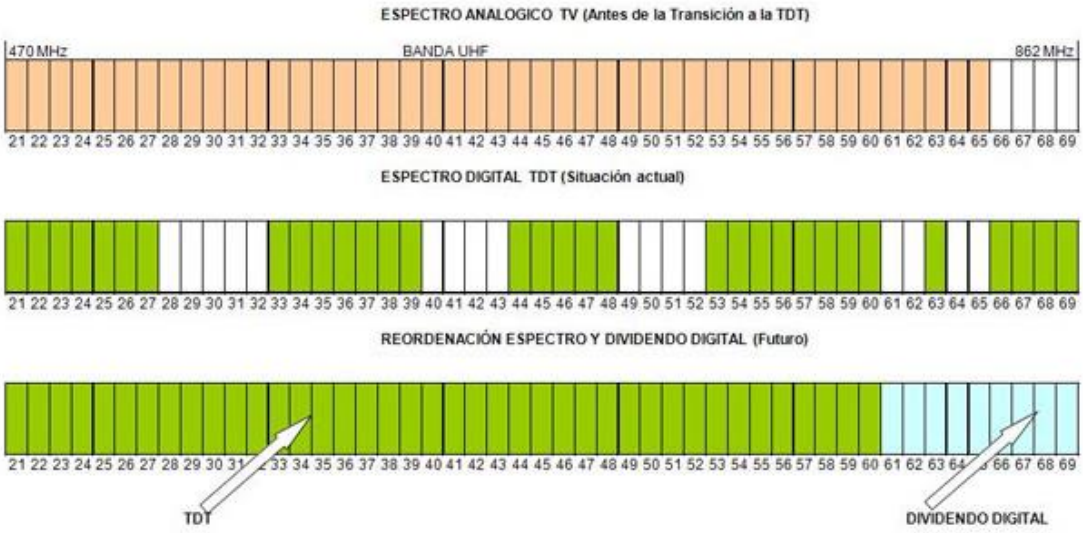


Figura 6. EVOLUCIÓN DEL ESPECTRO

la telefonía móvil y aquí es donde entra en juego la banda de televisión, cuyas características de propagación y penetración en el interior de edificios la convierten en una buena candidata. Para poder disfrutar de los nuevos servicios de banda ancha que proporciona el 4G, es necesario disponer de un conjunto de frecuencias contiguo a la que actualmente se utiliza para el tráfico de datos y voz. En Europa se ha decidido que este rango sea el comprendido entre los 790MHz y los 862MHz, pero en España esta zona del espectro se encontraba parcialmente ocupada por canales de televisión digital terrestre. La liberación de este rango de frecuencias propicia la aparición de lo que denominamos el Dividendo Digital.

2.6. Impacto del Dividendo Digital en la economía

La liberación del dividendo digital ha favorecido entre otras cosas a potenciar el desarrollo de la economía europea, mejorando la productividad y potenciando el empleo.[6]El tráfico de datos móviles está experimentando en los últimos años un crecimiento exponencial, lo que causa que haya necesidad de más frecuencias para poder transmitir. En la siguiente figura 7 podemos ver este crecimiento comparado con la previsión para el tráfico de voz.

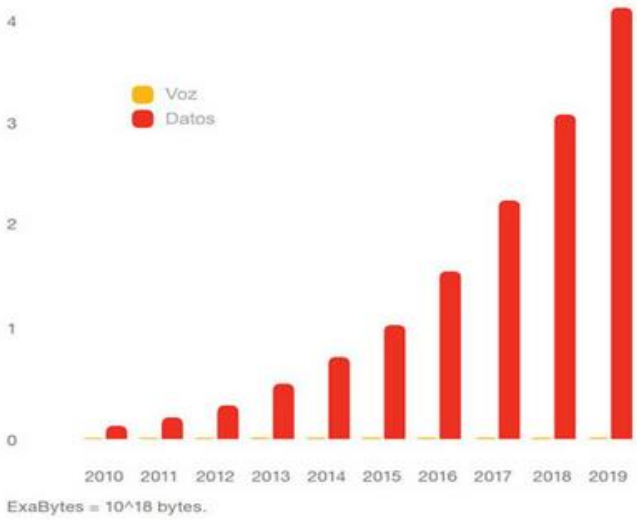


Figura 7. EVOLUCIÓN TRÁFICO DATOS Y VOZ

Este aumento de la demanda de servicios de datos se ve reflejado directamente en el producto interior bruto de todos los países en los que se ha implantado el 4G. En la siguiente figura 8 podemos apreciar un estudio de diferentes universidades sobre la previsión de los puntos porcentuales que crecerá el PIB por cada aumento del 10% en los servicios de banda ancha para cada país. España está englobada en el grupo OECD-High.

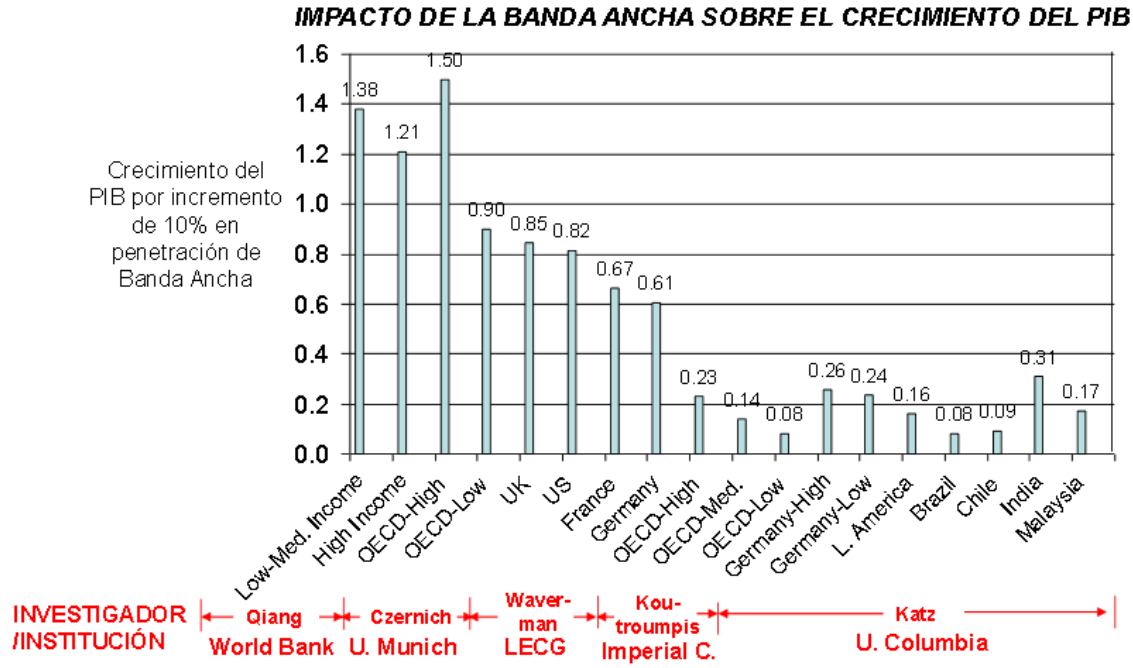


Figura 8. IMPACTO BANDA ANCHA SOBRE PIB

3. Instrumentación y estudio previo

Una vez hemos explicado que es y en que consiste Cognitive Radio procederemos a explicar el proceso que seguimos al realizar nuestro estudio en la ciudad de Barcelona.

En este capítulo veremos los instrumentos que usamos durante nuestro estudio y también veremos los resultados de todos los estudios previos que realizamos para familiarizarnos con ellos realizando medidas outdoor en los alrededores del edificio D4 del Campus Nord.

3.1. Desglose del equipo de montaje

El equipo que se utilizó tanto durante esta fase previa como durante la campaña de medidas está compuesto por:

- Un analizador de espectro
- Un portátil con el programa MATLAB
- Un dispositivo GPS
- Una antena
- Un filtro eliminabanda
- Un cable Ethernet
- Un cable coaxial

Todos estos elementos constituyen nuestro equipo de medidas.

A continuación pasaremos a explicar brevemente cada componente de nuestro equipo de medidas:

- La antena que se ha utilizado es una *DS3000A – DA753G Wideband Discone antenna.* Esta antena está diseñada para recibir transmisiones entre los 75 MHz y los 3000 MHz y puede transmitir en las bandas de 144, 430, 904 y 1200 MHz por debajo de los 50 Watts. La antena mide 2,9 pies (88 cm) y pesa 1,55 lbs (0,7 Kg). [7]

- El analizador de espectros usado ha sido un *Anritsu Spectrum Master MS2721B*. Es un analizador diseñado para llevar a cabo medidas altamente precisas de señales celulares o inalámbricas incluyendo 802.11 a, 3G o WiMAX. Este modelo es ideal para medir señales de broadcast de AM o de FM dado su ancho de banda dinámico y su bajo ruido de fase. Entre las diferentes funcionalidades de este analizador se encuentra la de poder medir las bandas ocupadas y la potencia de canal que es justamente la que nos interesa a nosotros.*[8]*

- Ordenador portátil con la herramienta MATLAB. El MATLAB es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio llamado lenguaje M. MATLAB se caracteriza además de por ser una herramienta matemática muy potente por poder comunicarse con otros dispositivos hardware. Gracias a ello pudimos representar gráficamente muchas de las medidas que tomamos con nuestra antena. Como más adelante veremos fue la herramienta utilizada para realizar el post procesado de la información recopilada durante nuestra campaña de medidas.[9]

- Se utilizó un filtro elimina banda *Mini Circuits NSBP-108+* acoplado a la antena para evitar captar interferencias indeseadas. El filtro en cuestión es capaz de eliminar las frecuencias entre los 88 MHz y los 108 MHz. Entre otros tipos de interferencia, con este filtro podremos eliminar los productos de intermodulación que pudiesen afectar a la banda de televisión.
- Por comodidad se decidió utilizar un dispositivo *Garmin GPS 18x USB.* La facilidad de configurarlo mediante el script lanzado por MATLAB a la hora de realizar las medidas y la sencillez con la que se podía conectar al portátil convertía a este dispositivo en el candidato

ideal para ubicar cada una de nuestras mediciones. El dispositivo GPS actuaba al principio de cada punto de medición y generaba un archivo con las coordenadas del punto actual.

- Se utilizaron un cable coaxial para conectar la antena al analizador y un cable Ethernet para conectar el analizador al portátil.

3.2. Estudios previos

Con el objetivo de familiarizarnos con los instrumentos que íbamos a utilizar durante la campaña de medidas y poder ajustar sus parámetros adecuadamente realizamos juntamente con el compañero proyectista una serie de estudios previos que a continuación pasamos a detallar.

3.2.1. Estudio sobre la atenuación y el preamplificador del analizador

Se realizaron diferentes pruebas variando tanto el nivel de atenuación del analizador como activando y desactivando el preamplificador, el cual aporta una ganancia de 20 dB. Cabe señalar que con el preamplificador activado los dos únicos valores de atenuación permitidos eran 0 dB o 10 dB.

Una vez realizada esta serie de pruebas llegamos junto con el compañero proyectista a la siguiente conclusión:

- Con el preamplificador desactivado y un nivel de atenuación elevado se llega a confundir el ruido con la señal, únicamente se pueden ver canales con atenuación 0 dB.

- Con el preamplificador activado e independientemente del nivel de atenuación (0 dB o 10 dB) se reduce el nivel de ruido interno en aproximadamente unos 15-20 dB. Asimismo, si desde el punto en el que se toma la medida hay visión directa con un transmisor, la señal puede llegar a saturar eliminando toda validez a la medida realizada.

Teniendo en cuenta estas dos afirmaciones se decidió tener el preamplificador activado y un nivel de atenuación de 10 dB siempre y cuando la señal no saturase, en cuyo caso pasaríamos a desactivar el preamplificador y variar la atenuación a 0dB. En la zona que yo analicé, y como más adelante explicaremos, este caso nunca se llegó a producir y por tanto todas las medidas fueron realizadas con 10 dB de atenuación y el preamplificador activado.

3.2.2. Impacto del número de trazas y de barridos

Uno de los problemas que se nos planteó a la hora de realizar la campaña de medidas fue la autonomía de los instrumentos. Gracias a este estudio previo pudimos optimizar la duración de una medida evitando a la vez que la resolución no fuese demasiado baja.

Un analizador de espectros tiene dos parámetros que según se modifiquen pueden alterar tanto la duración como la resolución de las medidas. Cabe distinguir entre número de trazas y numero de barridos. El número de barridos indica la cantidad de veces que se va a recorrer el rango frecuencial que haya sido seleccionado (la banda de televisión), y el número de trazas indica cuantas medidas se van a tomar en cada uno de los puntos seleccionados (canales de televisión) dentro del rango frecuencial que se recorre.

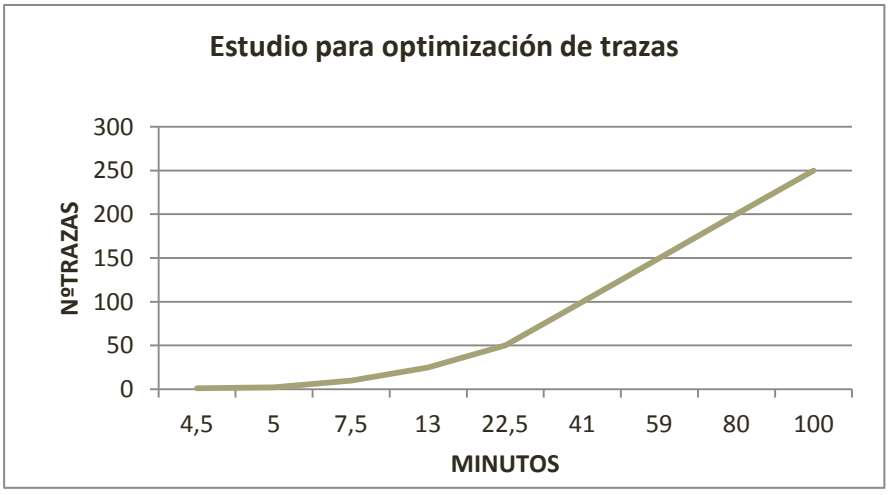
Llegados a este punto se nos planteaban dos cuestiones:

1- Es mejor seleccionar un número de barridos alto y solo una traza por barrido o un número alto de trazas y un solo barrido.

2- Cuantos barridos en el primer caso y cuantas trazas en el segundo

Contestar a la primera pregunta fue bastante sencillo. Se realizó una prueba que consistió en lanzar una medida con un solo barrido de 25 trazas por punto y otra medida con 25 barridos de una sola traza por punto. Las conclusiones fueron evidentes, en el segundo caso el analizador dedicaba una gran cantidad de tiempo cada vez que terminaba un barrido que no se dedicaba al realizar 25 trazas en un solo barrido. Para cada caso, se calculó la desviación estándar y la potencia media por canal, obteniendo unos resultados que diferían a partir de la tercera cifra decimal siendo la desviación estándar pequeña.

Para contestar a la segunda cuestión se realizaron una serie de medidas, todas ellas de un solo barrido, mientras que se aumentaba progresivamente el número de trazas. Como podemos ver en la gráfica 1 se realizaron medidas de hasta 250 trazas.



Gráfica 1. OPTIMIZACIÓN DE TRAZAS

Teniendo en cuenta que la autonomía del portátil era de unas 3 horas y nosotros queríamos hacer unas 6 medidas diarias se estimó que la duración máxima de una medida debía ser aproximadamente 30 minutos y por tanto decidimos que el número de trazas sería 50.

3.2.3. Medidas outdoor Campus Nord

En este apartado se explica la primera toma de contacto con las medidas outdoor. Por proximidad y para complementar un estudio indoor realizado con anterioridad por la directora del proyecto Anna Umbert, se decidió realizar este estudio alrededor del edificio D4 del Campus Nord.

Se escogieron tres canales ocupados dentro de la banda de televisión. Un canal perteneciente al rango de las bajas frecuencias, el 26. Un canal perteneciente al rango de las frecuencias medias, el 44. Y por último un canal perteneciente al rango de las altas frecuencias, el 61. Asimismo, a diferencia del estudio anterior aquí no interesaba promediar las medidas así que aunque fuese más lento se decidió realizar 50 barridos de una sola traza cada uno. Al no promediar cada uno de los barridos se podían calcular distintos parámetros como por ejemplo la varianza y la desviación típica.

Como ya se ha mencionado, este estudio se ha realizado entre otros motivos para complementar un estudio indoor realizado en los despachos del D4. Con motivo de la distribución de las medidas realizadas indoor se ha decidió realizar la distribución del estudio outdoor para que ciertos puntos quedasen alineados con los puntos indoor. Para ello, la distancia adecuada entre punto y punto era de 4 metros. La distribución de los puntos donde se han realizado medidas se puede apreciar en la figura 9. Cabe señalar que los puntos de las esquinas se encuentran a 2 metros de la perpendicular trazada desde la esquina del edificio D4.

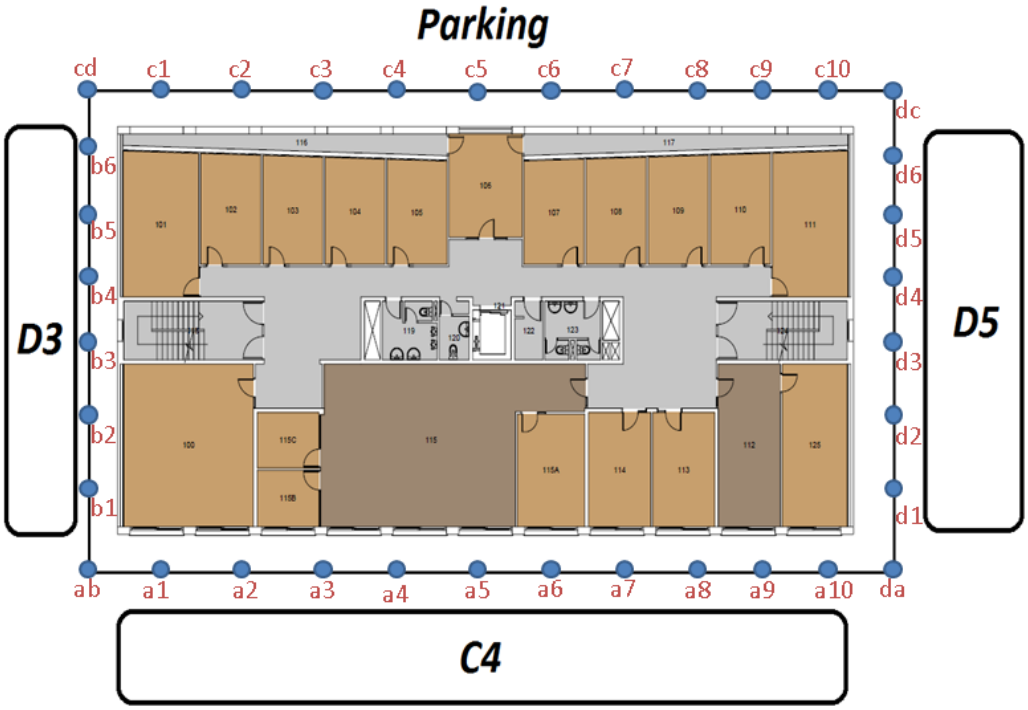


Figura 9. DISTRIBUCIÓN PUNTOS MEDIDAS

Para mayor facilidad a la hora de comprar resultados entre las diferentes calles nos referiremos a ellas de la siguiente forma:

- Calle A: Comprendida entre los edificios C4 y D4
- Calle B: Comprendida entre los edificios D3 y D4
- Calle C: Comprendida entre el edificio D4 y el parking
- Calle D: Comprendida entre los edificios D4 y D5

El objetivo de este estudio era ver la variación que experimentaba la potencia para cada canal según el punto. A simple vista, se esperaba que la potencia en los puntos de la calle A fuese menor que en los puntos de la calle C, puesto que los puntos de la calle C estaban expuestos directamente a la transmisión de la antena de Collserola, situada al noroeste de los mismos. A continuación se muestra la tabla 4 donde podemos ver para cada punto los siguientes datos:

- Coordenadas del punto (X,Y,Z). Se toma el punto AB como eje de coordenadas y altura nula (Z=0)
- Potencia del canal 26
- Potencia del canal 44

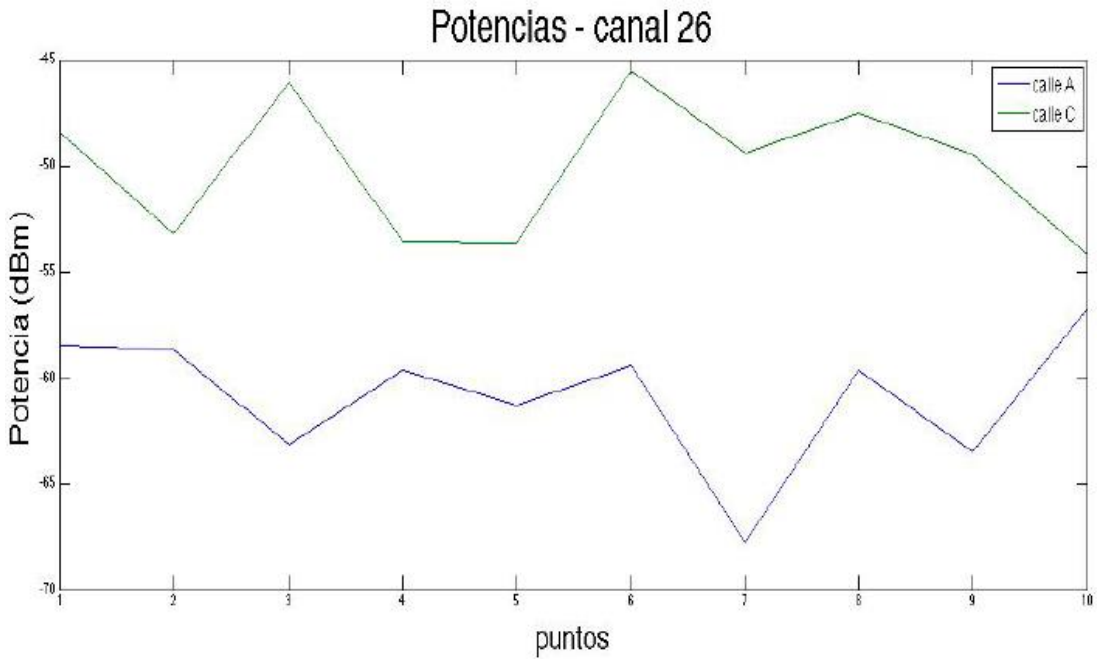
- Potencia del canal 61
- Desviación standard del canal 26
- Desviación standard del canal 44
- Desviación standard del canal 61

PUNTO	X(m)	Y(m)	Z(m)	P26 (dBm)	P44 (dBm)	P61 (dBm)	STD26 (dB)	STD44 (dB)	STD61 (dB)
A1	4	0	0	-58,4094	-54,1652	-69,7839	0,3142	0,3440	0,5909
A2	8	0	0	-58,6219	-56,0544	-67,5282	0,3646	0,4538	0,2773
A3	12	0	0	-63,1391	-61,0474	-69,2192	0,8945	0,5415	0,7042
A4	16	0	0	-59,5823	-56,4198	-70,6170	0,5044	0,3606	0,5803
A5	20	0	0	-61,2485	-62,5829	-73,0356	0,8214	0,5561	0,6464
A6	24	0	0	-59,4200	-62,9164	-72,8893	0,1575	0,9942	0,5031
A7	28	0	0	-67,7583	-63,7322	-66,5690	1,4669	0,7519	0,5489
A8	32	0	0	-59,5942	-62,0961	-73,1257	0,4222	0,9741	0,9122
A9	36	0	0	-63,4878	-63,4054	-78,3674	0,6521	0,7228	0,5418
A10	40	0	0	-56,7242	-62,3879	-71,3430	0,9274	1,2457	0,4618
AB	0	0	0	-58,8437	-59,4456	-67,6942	0,3979	0,7401	0,5797
B1	0	4	0	-56,1263	-53,0174	-67,1823	1,3454	0,5206	1,2049
B2	0	8	0	-55,8183	-58,5002	-71,4104	0,8054	1,1549	1,7077
B3	0	12	0	-60,8133	-60,8714	-68,7308	1,7345	1,4268	3,2540
B4	0	16	0	-50,6817	-51,7140	-58,0250	0,8764	2,0931	1,1727
B5	0	20	0	-52,3610	-51,2210	-62,4174	3,0435	0,8592	1,9354
B6	0	24	0	-54,5199	-52,4886	-55,8374	1,2777	0,7946	1,0082
BC	0	28	0	-47,5480	-48,5591	-55,4255	0,9369	1,1336	1,4152
C1	4	28	0	-48,3946	-45,4490	-62,0248	0,6219	0,7074	0,8734
C2	8	28	0	-53,1880	-48,3699	-57,8085	3,4800	1,5858	0,7083
C3	12	28	0	-46,0487	-52,6888	-57,4257	0,4594	1,7265	1,2361
C4	16	28	0	-53,5184	-48,9157	-55,5066	1,4439	1,1279	0,8898
C5	20	28	0	-53,6136	-43,8650	-58,7725	1,0132	1,1504	1,2019
C6	24	28	0	-45,5028	-42,6740	-58,2492	0,5183	0,3764	0,9730
C7	28	28	0	-49,4088	-51,8517	-51,4216	0,8125	1,5229	0,6667
C8	32	28	0	-47,5530	-50,8829	-57,3256	0,6283	0,9600	1,0691
C9	36	28	0	-49,4778	-41,9011	-62,9128	0,5591	0,6975	1,3555
C10	40	28	0	-54,1681	-48,6346	-57,2940	0,9673	0,8786	1,1389
CD	44	28	0	-48,2944	-49,1568	-51,0559	1,6025	0,8393	0,6719
D1	44	4	0	-54,8393	-53,1767	-68,3746	0,1940	0,2522	1,0036
D2	44	8	0	-57,7725	-56,1168	-71,4969	0,5253	0,3150	0,9499
D3	44	12	0	-61,8411	-52,0520	-62,7335	0,4890	0,3734	0,4410
D4	44	16	0	-51,4048	-51,7989	-63,1398	0,6285	0,8476	0,7524
D5	44	20	0	-55,6149	-48,7841	-65,6436	1,6965	1,7139	1,2776
D6	44	24	0	-47,5722	-48,0911	-57,8079	1,1630	1,6479	0,8360
DA	44	0	0	-56,6845	-58,3176	-70,0822	0,2718	0,5410	0,7936

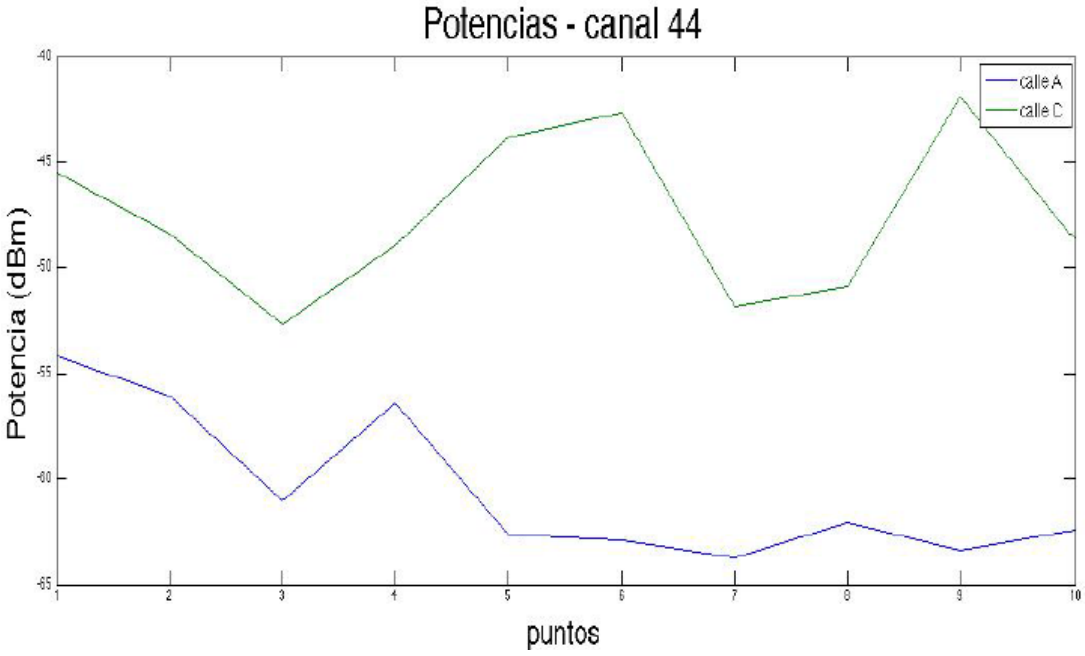
Tabla 4.RESUMEN MEDIDAS OUTDOOR CAMPUS NORD

Lo primero que podemos extraer de los resultados es que son consistentes ya que al fijarnos en los valores de la desviación típica vemos que raramente sobrepasa los 2dB. Esto significa que la diferencia entre los 50 barridos no es significativa.

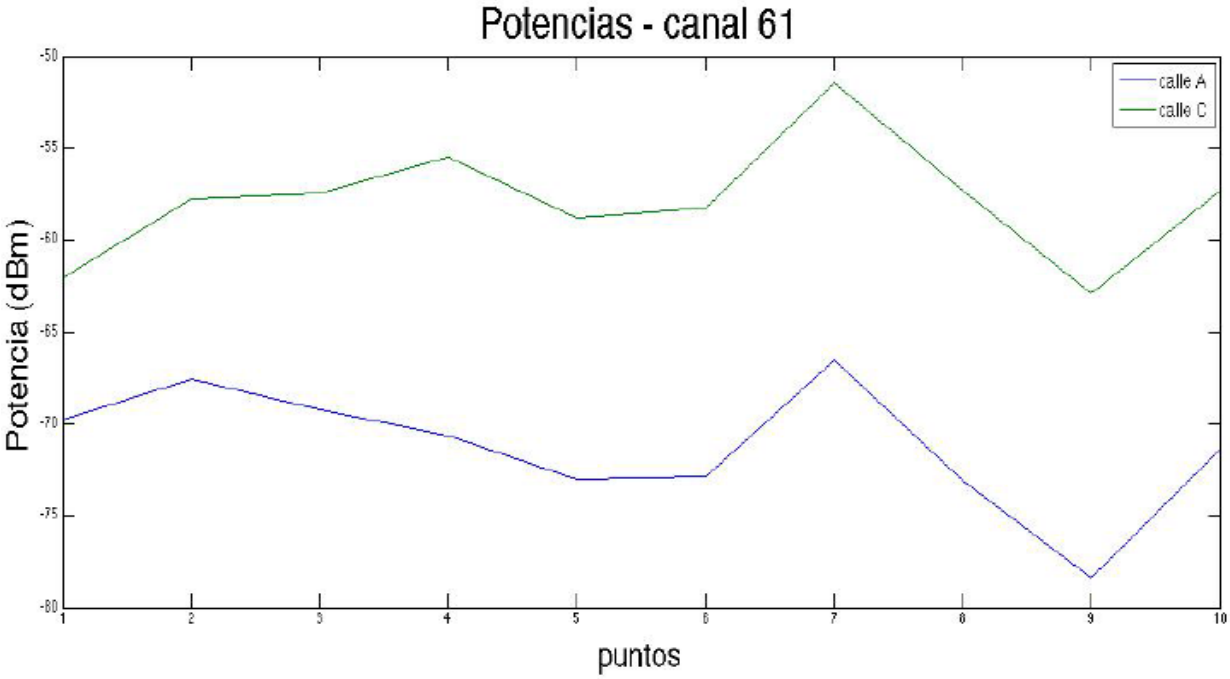
Como ya habíamos previsto se observa una diferencia significativa en la potencia entre los puntos de la calle C y el resto de calles siendo la calle A la peor. Esto es debido a que los puntos de la calle C tienen exposición directa a la antena de Collserola mientras que para el resto de las calles las ondas tienen que atravesar elementos sólidos. Con el fin de visualizar con mayor facilidad este hecho, a continuación se pueden ver tres gráficas (gráfica 2, gráfica 3, gráfica 4), una para cada canal, donde se ve la diferencia entre cada punto de la calle A con su correspondiente de la calle C.



Gráfica 2. COMPARATIVA CALLE A-C CANAL26



Gráfica 3. COMPARATIVA CALLE A-C CANAL44



Gráfica 4. COMPARATIVA CALLE A-C CANAL63

Efectivamente, podemos ver como la línea de las potencias en la calle A siempre está por debajo de las potencias de la calle C.

Otro fenómeno remarcable es que independientemente del punto, la potencia para el canal 61 siempre será más baja que la potencia del canal 44 y esta a su vez será más baja generalmente que la del canal 26. Se podría pensar que este fenómeno es debido a que para cada canal se emite una potencia distinta, y pese a que es cierto, el motivo real por el que ocurre es porque a medida que la frecuencia disminuye, las ondas penetran en los obstáculos con mayor facilidad.

3.2.4. Estudios complementarios

Como complemento a las medidas outdoor realizadas alrededor del edificio D4, se decidieron llevar a cabo otros tres estudios. Mediante ellos, se pretendía tener una visión más detallada de cómo afecta la cercanía de los obstáculos y la altura a la que se sitúa la antena respecto al nivel del suelo.

Por un lado se realizaron unas medidas complementarias en los puntos A2, A5, A6, A9 separando la antena intervalos de 2 metros hacia lado y lado hasta cubrir un rango de 12 metros desde el punto central. Por otro lado, se realizaron medidas en los puntos A2, A5, A6, A9, C2 y C9 con un mástil que permitía elevar la antena hasta los 4,5 metros, altura equiparable a la de un primer piso. El tercer estudio complementario consistió en repetir las medidas de los puntos A2, A5, A6, A9, C2 y C9 con la antena básica para apreciar si el factor temporal era significativo a la hora de realizar las medidas. En este apartado explicaremos los dos últimos estudios mientras que el primero será explicado por el compañero proyectista con el que se realizaron los estudios previos.

Mediante un mástil de aproximadamente 4,5 metros acoplado a la antena se realizaron medidas en los puntos A2, A5, A6, A9, C2 y C9.

Estas medidas tenían dos motivaciones, en primer lugar, comprobar la diferencia entre las medidas realizadas con y sin el mástil. En segundo lugar, las medidas fueron de utilidad para compararlas con las que previamente había realizado la directora de este proyecto Anna Umbert en la primera planta del edificio D4. En la Tabla 5 podemos ver los resultados representados de la misma forma que en la tabla del estudio anterior para las medidas realizadas con el mástil.

PUNTO	X(m)	Y(m)	Z(m)	P26 (dBm)	P44 (dBm)	P61 (dBm)	STD26 (dB)	STD44 (dB)	STD61 (dB)
A2	8	0	0	-58,6219	-56,0544	-67,5282	0,3646	0,4538	0,2773
A5	20	0	0	-61,2485	-62,5829	-73,0356	0,8214	0,5561	0,6464
A6	24	0	0	-59,4200	-62,9164	-72,8893	0,1575	0,9942	0,5031
A9	36	0	0	-63,4878	-63,4054	-78,3674	0,6521	0,7228	0,5418
C2	8	28	0	-53,1880	-48,3699	-57,8085	3,4800	1,5858	0,7083
C9	36	28	0	-49,4778	-41,9011	-62,9128	0,5591	0,6975	1,3555
A2 MASTIL	8	0	6	-57,9985	-61,7252	-73,4432	0,1150	0,1473	0,2111
A5 MASTIL	20	0	6	-60,2360	-56,1219	-75,2745	0,1458	0,1293	0,2507
A6 MASTIL	24	0	6	-61,3644	-60,5071	-72,9619	0,1392	0,1994	0,3037
A9 MASTIL	36	0	6	-64,8894	-59,8585	-74,8780	0,2474	0,2161	0,3223
C2 MASTIL	8	28	6	-53,5241	-55,5484	-55,6564	0,6816	1,0625	0,3584
C9 MASTIL	36	28	6	-50,5423	-54,5843	-55,1597	0,4775	0,5724	0,2912

Tabla 5.RESUMEN MEDIDAS OUTDOOR CAMPUS NORD CON Y SIN MÁSTIL

Si comparamos cada medida realizada con el mástil con su correspondiente realizada sin él, se puede apreciar como en general se aprecian diferencias que rondan los 1-2 dB. Esta diferencia no se puede considerar significativa y por lo tanto no nos afectara a la hora de realizar la campaña de medidas. Aun así se intentara, en la medida de lo

posible, buscar ubicaciones lo más despejadas posibles para evitar un efecto adverso.

Cabe resaltar que el motivo por el que las medidas C2 MASTIL y C9 MASTIL son totalmente incoherentes con las medidas C2 y C9 es debido a que al situar la antena a prácticamente 5 metros de altura en la calle C, esta quedaba escondida entre la arboleda haciendo que no pudiese captar la señal proveniente de Collserola adecuadamente.

En la Figura 10 podemos apreciar la potencia medida con el mástil para cada uno de los cuatro puntos de la calle A. En ellas, se puede apreciar con claridad que a medida que la frecuencia aumenta, es más difícil para la señal atravesar obstáculos sólidos y por tanto, las potencias tienden a igualarse.

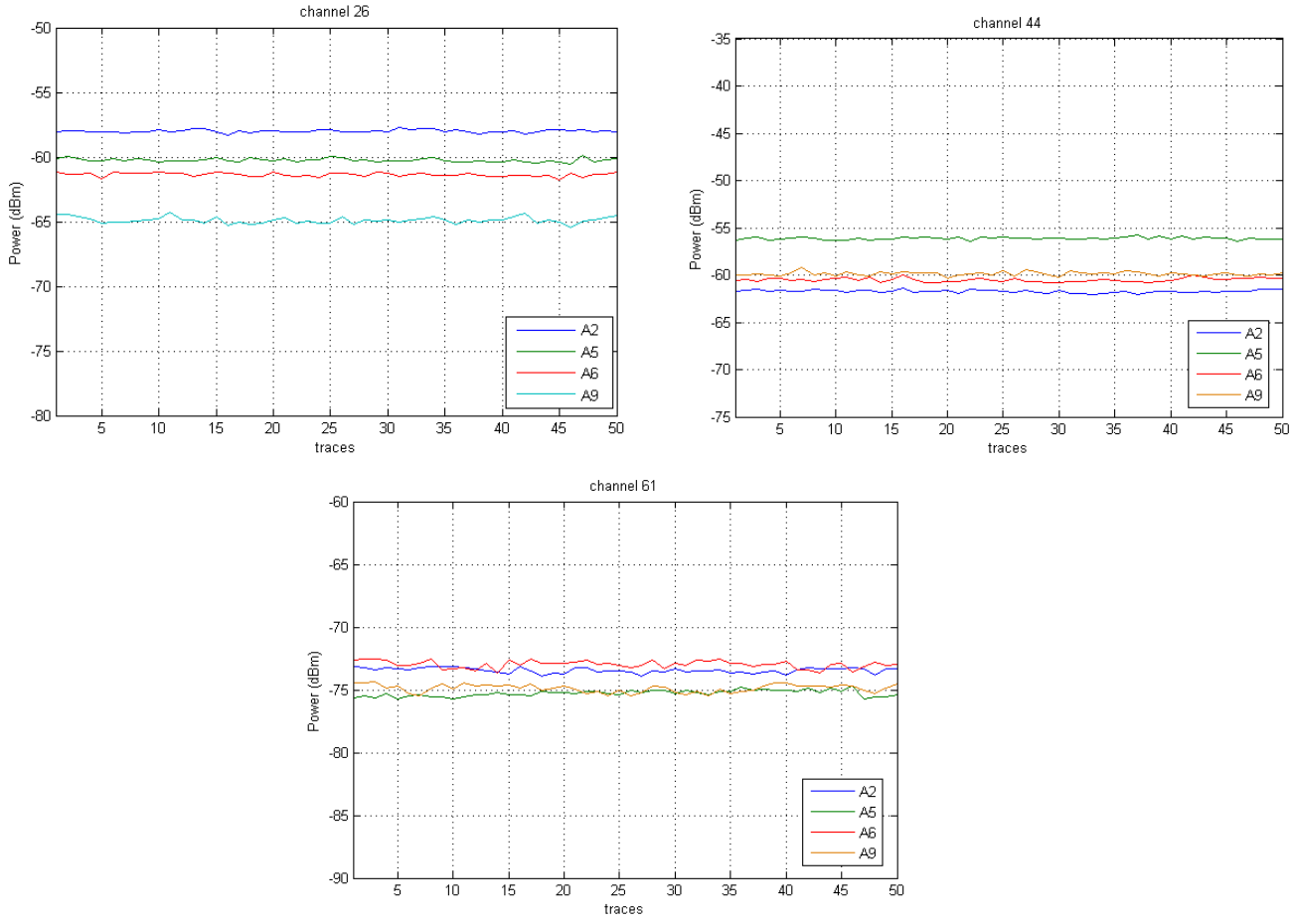


Figura 10. Potencia medida con el mástil para cada uno de los cuatro puntos de la calle A

Una vez obtenidos los resultados de las medidas realizadas con el mástil se procedió a realizar una repetición de las medidas en los mismos puntos, a los cuales nos referiremos como medidas BIS, pero utilizando esta vez de nuevo la antena con su altura convencional. El objetivo de esta serie de medidas era, como se ha comentado anteriormente, verificar la estabilidad de las medidas a través del tiempo, es decir, que dos medidas realizadas en días distintos no varían en exceso. Este estudio nos era de gran valor puesto que nuestra campaña no iba a ser realizada en un solo día, al contrario, íbamos a necesitar bastantes días para poder cubrir la zona delimitada.

Una vez realizadas las medidas señaladas, los resultados fueron los que se muestran en la siguiente tabla 6:

PUNTO	X(m)	Y(m)	Z(m)	P26 (dBm)	P44 (dBm)	P61 (dBm)	STD26 (dB)	STD44 (dB)	STD61 (dB)
A2	8	0	0	-58,6219	-56,0544	-67,5282	0,3646	0,4538	0,2773
A2 BIS	8	0	0	-60,8643	-57,7346	-70,7429	0,8557	0,4963	0,8913
A5	20	0	0	-61,2485	-62,5829	-73,0356	0,8214	0,5561	0,6464
A5 BIS	20	0	0	-61,4674	-62,0172	-72,4716	0,4568	1,0844	1,1003
A6	24	0	0	-59,4200	-62,9164	-72,8893	0,1575	0,9942	0,5031
A6 BIS	24	0	0	-62,1011	-59,3387	-66,9852	0,4418	1,0268	0,5251
A9	36	0	0	-63,4878	-63,4054	-78,3674	0,6521	0,7228	0,5418
A9 BIS	36	0	0	-62,3505	-61,8913	-74,6534	1,0742	1,4969	0,9844
C2	8	28	0	-53,1880	-48,3699	-57,8085	3,4800	1,5858	0,7083
C2 BIS	8	28	0	-55,3140	-54,6577	-53,0816	0,9093	1,9468	0,8586
C9	36	28	0	-49,4778	-41,9011	-62,9128	0,5591	0,6975	1,3555
C9 BIS	36	28	0	-56,8290	-46,9419	-58,8831	1,3854	0,8975	1,2438

Tabla 6.RESUMEN MEDIDAS PARA VERIFICACIÓN ESTABILIDAD MEDIDAS EN EL TIEMPO

Podemos apreciar pequeñas diferencias entre las medidas originales y las medidas BIS. Estas diferencias oscilan entre 1dB y 2 dB en el caso intermedio pero alcanzan los 7dB en el peor de los casos, lo que nos hace plantearnos que aspectos como pueden ser la meteorología tienen una gran incidencia a la hora de tomar medidas. Intentaremos evitar por tanto intentar tomar medidas en días con una meteorología similar y ante todo evitaremos los días con lluvia.

4. Planificación y procedimiento de medición

En el presente capítulo nos centraremos en cómo se planificó y como se llevó a cabo a posteriori la campaña de medidas. Recordemos que la motivación de llevar a cabo esta campaña de medidas es la futura realización de un REM (Radio Environment Map) del AMB (Area Metropolitana de Barcelona).

4.1. La zona de estudio

El Area Metropolitana de Barcelona engloba un total de 35 municipios distribuidos alrededor de la ciudad de Barcelona tal y como se puede apreciar en la figura 11.

Figura 11. ZONA DE ESTUDIO

Dentro de la totalidad de los municipios del AMB se escogieron 22, los cuales procedimos a dividir entre municipios de la zona norte y de la zona sud del área metropolitana de Barcelona. Los municipios restantes se decidieron descartar debido a su lejana ubicación de la zona de interés. En este proyecto se muestran las medidas y los resultados de los municipios pertenecientes a la zona sud del área metropolitana de Barcelona, que son los siguientes:

- El Prat de Llobregat
- Sant Boi de Llobregat
- Cornellà de Llobregat
- Hospitalet de Llobregat
- Esplugues de Llobregat
- Sant Joan Despi
- Sant Just Desvern
- Sant Feliu de Llobregat
- Santa Coloma de Cervelló
- Sant Vicenç dels Horts
- Molins de Rei

4.2. Planificación de las medidas

En proyectos anteriores, ya se habían realizado medidas en el AMB pero por la gran distancia entre las medidas, los resultados obtenidos no permitían llevar a cabo la construcción de un REM. Como consecuencia de estas primeras pruebas, en el presente proyecto se ha buscado optimizar la distancia entre las medidas para obtener unos resultados más adecuados a este fin.

Como primera aproximación se valoró la posibilidad de realizar una cuadrícula de 5km por 5 km sobre los municipios del AMB, que se descartó rápidamente debido a que había municipios en los cuales no se hubiese llevado a cabo ninguna medida, incumpliendo nuestras propias especificaciones.

Seguidamente se propuso realizar este mismo experimento con una cuadricula de 2km por 2 km con lo que evitaríamos la ausencia de medidas en los municipios más pequeños. No obstante, este método tampoco era viable puesto que había zonas, como el aeropuerto del Prat, a las cuales no se tenía acceso y por tanto hubiesen quedado áreas muy extensas sin ninguna medida.

Finalmente, agrupando la dos primeras ideas, se optó por una tercera opción en la que dada una medida, debería encontrarse otra en un radio de como máximo 2 km. Con esta solución, se podían adaptar las medidas para que primero, no se quedase ningún municipio sin ninguna medida, y segundo, se reducirían al máximo las zonas sin cubrir ya que se podrían realizar medidas en zonas limítrofes de libre acceso. Otro punto beneficioso de esta metodología de medición fue que pudimos escoger entre una gran variedad de entornos geográficos como pudieron ser zonas urbanas, polígonos industriales o entornos forestales lo que a posteriori nos proporcionó la posibilidad de ver como afectaba el entorno a las medidas.

Una vez decidida la metodología que seguiríamos para realizar las medidas se inició la planificación de las rutas, las cuales estaban sujetas a la autonomía de los equipos de medida como factor limitante a tener en cuenta. Como se ha mencionado anteriormente, las baterías del analizador y del portátil nos garantizaban un tiempo activo de medida de alrededor de 3 horas. Teniendo en cuenta este dato y que el tiempo de una medida no iba a ser superior a 40 minutos, incluyendo el tiempo que se tardaría en realizar el trayecto entre punto y punto, se planificaron rutas de entre 4 y 6 puntos.

Las rutas se planificaron mediante la herramienta Google Earth, a la que a partir de una serie de ficheros, agregamos los contornos de cada uno de los municipios. Acto seguido procedimos a diseñar las rutas de tal manera que se realizase una medida en cada tipo de entorno que pudiésemos encontrar dentro del municipio, siempre que esta fuese accesible.

Las ubicaciones que se muestran a continuación son aproximadas, ya que al realizar las medidas de campo estábamos sujetos a factores como obras públicas que nos podían llegar a impedir realizar la medida en el punto

originalmente planificado. En tal caso, se buscaba la ubicación más cercana al punto planificado en la que poder llevar a cabo la medida.

En la figura 12 se muestra la ubicación geográfica de las medidas realizadas en los municipios de Hospitalet de Llobregat y el Prat de Llobregat. En el primer caso, y por ser un municipio exclusivamente urbano, se consideró oportuno el realizar solamente una medición, mientras que en el segundo caso se realizaron tres medidas, la primera en el núcleo urbano de El Prat, la segunda en la playa al sud del aeropuerto, y la tercera en la zona del polígono Pratense. Cabe señalar que el municipio de El Prat de Llobregat fue el que más problemas nos causó debido a la presencia del aeropuerto, el cual abarca una gran extensión de terreno a la que no se nos estaba permitido el acceso.

Figura 12. UBICACIÓN GEÓGRAFICA MEDIDAS HOSPITALET Y EL PRAT DE LLOBREGAT

En la figura 13 se pueden apreciar los puntos medidos en los municipios de Esplugas de Llobregat y en Sant Just Desvern. En este caso, se consideró necesario realizar tres medidas en cada uno de los municipios debido a que la geografía de los mismos daba lugar a distintos tipos de entornos. Se realizaron medidas en entornos urbanos, en zonas industriales y en zonas forestales.

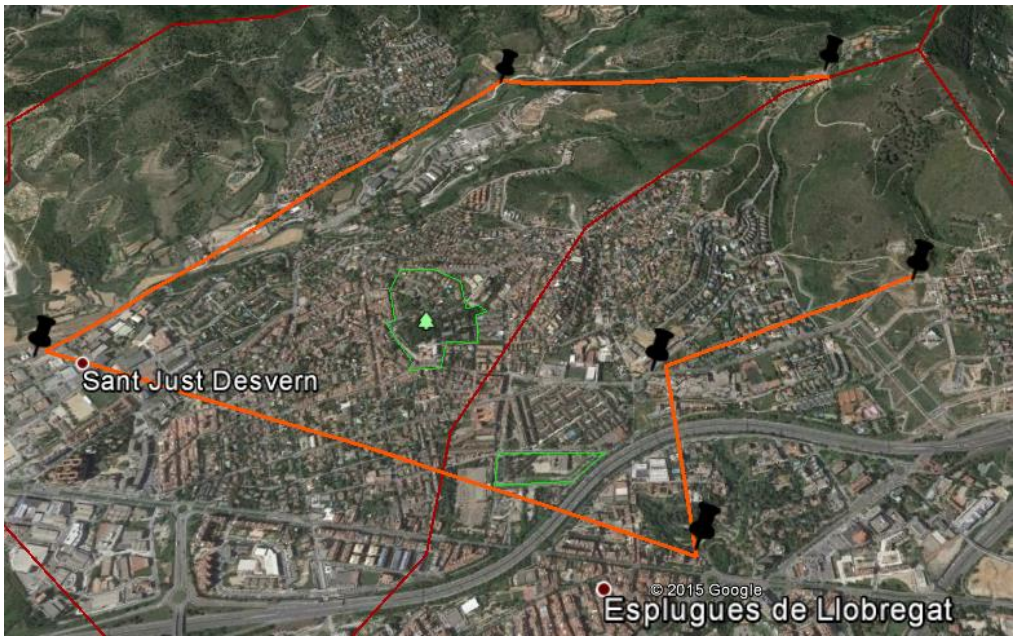


Figura 13. UBICACIÓN GEÓGRAFICA ESPLUGAS DE LLOBREGAT Y SANT JUST DESVERN

En la figura 14 podemos ver los puntos realizados en los municipios de Sant Feliu de Llobregat y Molins de Rei. Para este segundo, podemos ver claramente en la figura los dos tipos de entorno, una zona urbana correspondiente a la población denominada igual que el municipio y una gran zona forestal correspondiente a la sierra de Collserola.

En el caso de Sant Feliu se realizaron tres medidas, una de ellas en zona boscosa y las dos restantes en zona urbana. Se realizaron

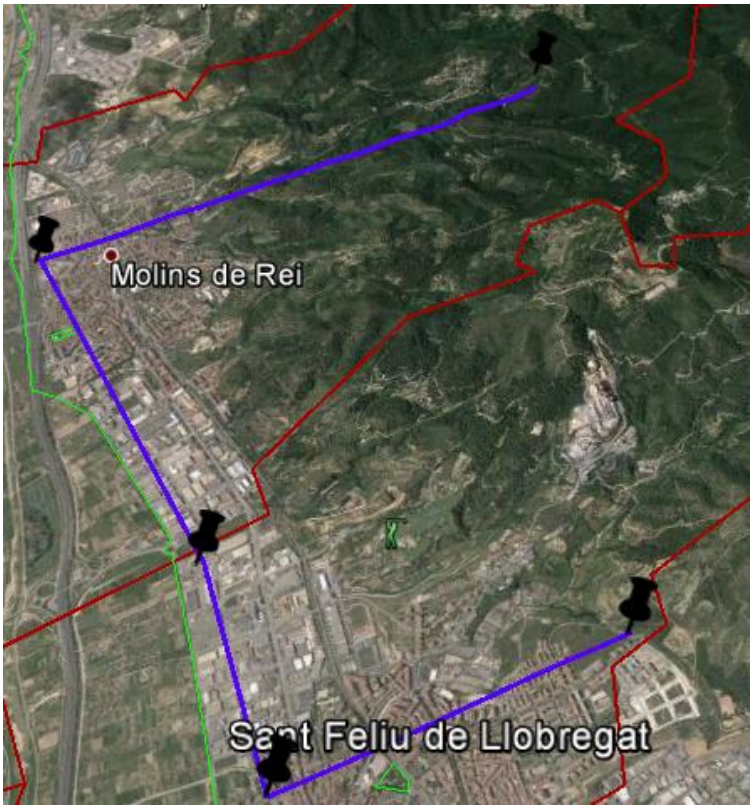


Figura 14. UBICACIÓN GEÓGRAFICA SANT FELIU DE LLOBREGAT Y MOLINS DE REI

dos medidas en zona urbana debido a la gran diferencia de paisaje, habiendo una zona con edificios de una altura considerable y otra zona mucho más rural con casas de una altura.

En la figura 15 podemos ver las dos medidas que se realizaron en los municipios de Santa Coloma de Cervelló y Sant Vicenç dels Horts. Como en los anteriores casos se realizó una medida en zona urbana y otra en una zona rural.

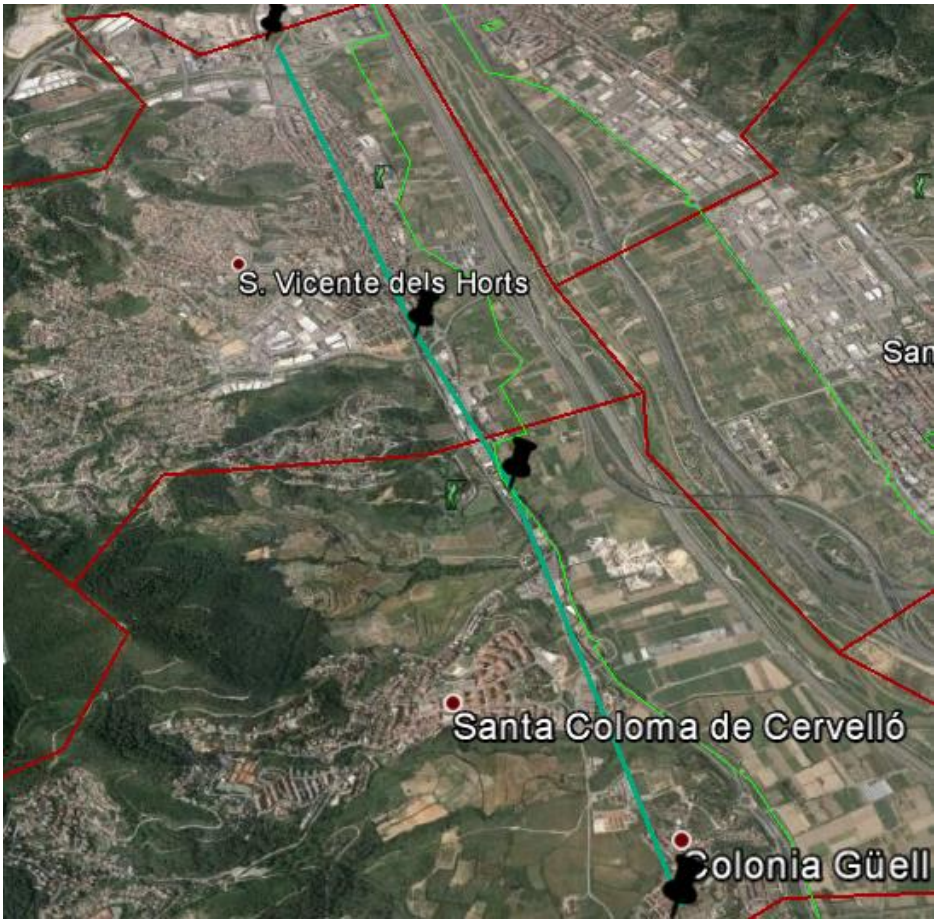


Figura 15. UBICACIÓN GEÓGRAFICA SANTA COLOMA DE CERVELLÓ Y SANT VICENÇ DELS HORTS

En la figura 16 podemos apreciar las 5 medidas que se realizaron en los municipios de Sant Boi de Llobregat, Cornellá de Llobregat y Sant Joan Despi. En el caso de los dos últimos, una sola medida bastó para caracterizarlos ya que se trataban de municipios mayoritariamente urbanos. Para Sant Boi, debido a su gran extensión se consideró necesario realizar un total de tres medidas.

Figura 16. UBICACIÓN GEOGRÁFICA MEDIDAS SANT BOI, CORNELLÁ Y SANT JOAN DESPÍ

Una vez planificadas las rutas, pudimos apreciar como el aeropuerto de El Prat provocaba que hubiese una zona demasiado grande sin cubrir, para evitarlo, se decidió realizar un punto extra ubicado al norte del mismo como podemos apreciar en la figura 17.

Figura 17. UBICACIÓN GEOGRÁFICA PUNTO EXTRA AEROPUERTO DEL PRAT

Asimismo, viendo que el municipio del Hospitalet de Llobregat era demasiado extenso para tener solamente una medida, se realizó una medida extra en la zona norte, más concretamente en la zona de Sant Josep tal como se muestra en la figura 18.

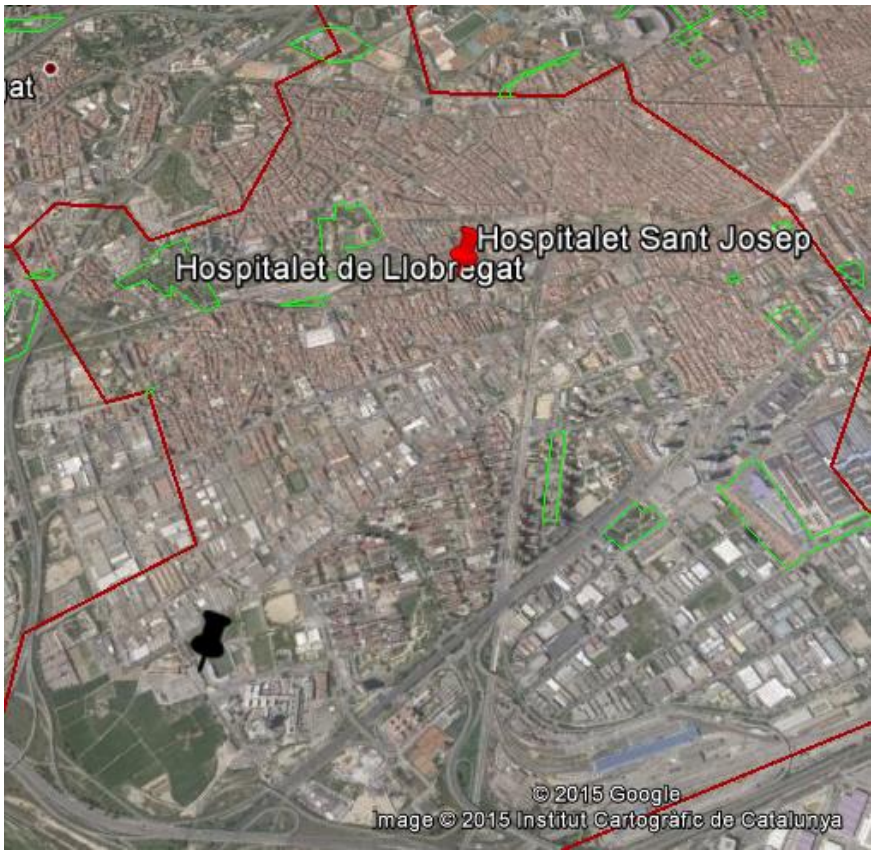


Figura 18. UBICACIÓN GEOGRÁFICA MEDIDA ZONA SANT JOSEP EN L'HOSPITALET DE LLOBREGAT

5. Procesado y análisis de los resultados

En el presente capitulo se explica el proceso que se siguió a la hora de procesar los datos que se habían obtenido durante la campaña de medidas realizada en la zona sud del Área Metropolitana de Barcelona y su posterior comparación con los resultados teóricos para poder ubicar canales de TV en desuso.

5.1. Procesado de datos

Una vez se han realizado todas las medidas necesarias nos disponemos a analizar los resultados para poder determinar si los canales están ocupados o no. Para ello, disponemos de la ayuda de un script de Matlab proporcionado por la tutora, el cual hemos modificado para adaptarlo a nuestras necesidades. Mediante el script podemos calcular el umbral de decisión a partir del cual podemos considerar un canal ocupado o desocupado (TVWS). Para calcular el umbral debemos realizar previamente una medida idéntica a las que realizamos en cualquiera de los puntos distribuidos por Barcelona pero substituyendo la antena por una carga adaptada de 50 Ω.

De este modo obtenemos el ruido que posteriormente podemos comparar con la señal y determinar el umbral. Este script requiere como parámetro la probabilidad de falsa alarma que deseamos. Este parámetro es la probabilidad de que se detecte como ocupado un canal que realmente no lo está, por defecto colocaremos este parámetro al 1%, ya que queremos que nuestras medidas sean lo más certeras posible.

5.2. Resultados teóricos

Nuestro objetivo en este proyecto era encontrar canales de televisión en desuso para su posible utilización para otros fines, para ello, primero debemos

conocer cuáles son los canales que teóricamente están o debieran estar ocupados y cuáles no.

Según la información que otorga el ministerio de Industria y Turismo, la distribución de los canales en la provincia de Barcelona en febrero de 2013 es la siguiente:

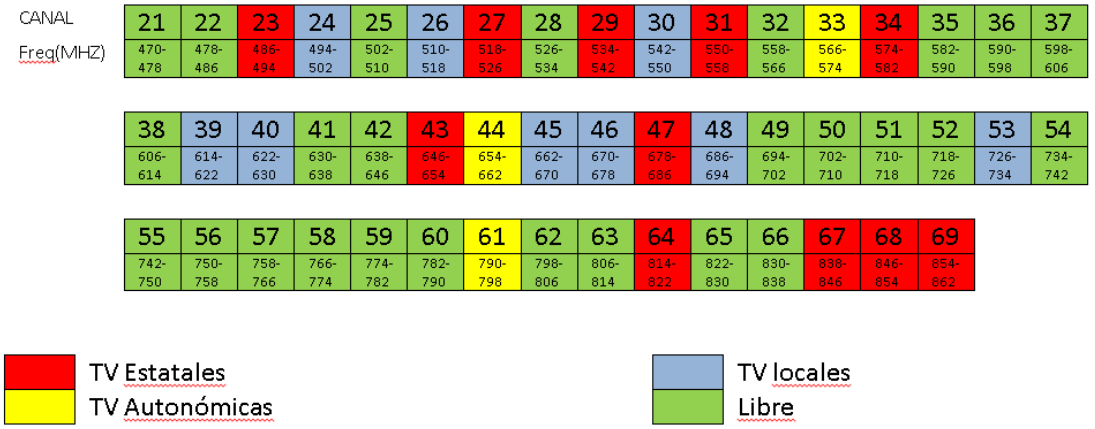


Figura 19. DISTRIBUCIÓN CANALES PROVINCIA DE BARCELONA EN FEBRERO DEL 2013

Como se aprecia en la figura 19, existen 3 tipos de canales:

- TV Estatal: Son canales de televisión que emiten a nivel estatal y que por lo tanto deberían estar ocupados en todo el territorio español
- TV Autonómicas: Son canales de televisión que emiten a nivel de comunidad autónoma y puesto que todas las medidas se han realizado en la comunidad de Catalunya, deberían estar ocupados en todos los puntos medidos.
- TV Locales: Son canales de televisión que emiten a nivel local y por lo general con muy poca potencia. Estos canales pueden estar o no ocupados dependiendo del punto en el que se realice la medida.

5.3. Resultados empíricos

Una vez conocidos los canales que deberían estar ocupados en cada una de las zonas en las que se realizaron medidas, nos disponemos a analizar las medidas tomadas. Para ello, en la siguiente tabla 7 se muestra la longitud y latitud de cada uno de los puntos medidos. Al tratarse de medidas realizadas en la ciudad de Barcelona todas las latitudes especificadas son correspondientes al hemisferio Norte y todas las longitudes son pertenecientes al Oeste del meridiano de Greenwich.

MUNICIPIO	PUNTO	LATITUD			LONGITUD		
		GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
Sant Boi	1	41	20	42,16	2	2	6,2
	2	41	19	55,09	2	2	38,76
	3	41	19	42,15	2	1	36,9
	4	41	18	51,31	2	3	49,34
Esplugas	1	41	23	38,39	2	5	38,3
	2	41	23	9,57	2	5	47,89
	3	41	22	40,74	2	5	19,11
	4	41	22	58,86	2	5	13,39
El Prat	1	41	19	45,35	2	6	4,81
	2	41	17	0,93	2	5	37,91
	3	41	19	29,18	2	7	21,64
Sant Feliu	1	41	23	23,74	2	3	30,33
	2	41	22	57,54	2	2	24
	3	41	23	38,79	2	1	54,39
Sant Just Desvern	1	41	23	41,73	2	4	47,77
	2	41	23	2,05	2	3	52,64
Hospitalet	1	41	20	48,32	2	6	3,12
	2	41	21	54,4	2	6	42,42
Sant Vicens	1	41	24	49,11	2	0	45,9
	2	41	23	10,72	2	0	50,43
Santa Coloma	1	41	21	37,59	2	1	38,76
	2	41	22	41,16	2	1	10,97
Molins de Rei	1	41	24	49,11	2	0	45,9
	2	41	25	40,67	2	2	44
Cornellá	1	41	21	3,69	2	4	5,88
Sant Joan Despí	1	41	21	57,16	2	3	54,73

Tabla 7. LATITUD Y LONGITUD PUNTOS DE MEDIDA

Tabla 88. TABLA RESUMEN MEDIDAS

	CANAL		Canal 21	Canal 22	Canal 23	Canal 24	Canal 25	Canal 26	Canal 27	Canal 28	Canal 29	Canal 30	Canal 31	Canal 32	Canal 33	Canal 34	Canal 35	Canal 36
	RANGO FRECUENCIAL (MHz)		470-478	478-486	486-494	494-502	502-510	510-518	518-526	526-534	534-542	542-550	550-558	559-566	566-574	574-582	582-590	590-598
	TEÓRICO																	
	RESUMEN																	
MUNICIPIOS	Sant Boi	Punto 1	-87,90	-75,04	-87,87	-87,78	-87,85	-83,22	-81,16	-87,89	-87,86	-87,87	-77,90	-87,85	-77,09	-76,86	-87,34	-79,80
		Punto 2	-87,90	-71,00	-87,59	-87,62	-87,95	-69,82	-63,59	-87,93	-87,89	-87,81	-61,66	-87,97	-68,13	-76,44	-87,55	-71,53
		Punto 3	-88,08	-70,82	-87,92	-87,89	-88,05	-76,98	-74,33	-87,96	-87,89	-85,42	-64,31	-87,96	-67,62	-71,54	-87,92	-82,82
		Punto 4	-87,71	-60,98	-87,64	-87,73	-87,94	-63,15	-65,01	-87,90	-87,79	-85,16	-63,44	-87,87	-56,81	-59,64	-86,35	-64,01
	Esplugas	Punto 1	-87,52	-64,05	-87,84	-88,09	-88,14	-78,23	-69,40	-88,17	-87,98	-84,70	-72,86	-88,08	-71,43	-72,09	-87,12	-71,50
		Punto 2	-88,24	-67,64	-87,99	-88,11	-88,22	-73,26	-69,81	-88,07	-88,05	-86,73	-74,42	-88,09	-74,52	-75,55	-86,41	-73,41
		Punto 3	-88,08	-76,97	-87,97	-87,89	-88,03	-83,28	-78,11	-88,02	-88,00	-88,03	-83,31	-88,00	-72,36	-77,11	-87,77	-84,90
		Punto 4	-87,61	-79,26	-88,07	-88,08	-88,12	-87,05	-75,85	-88,10	-88,04	-87,99	-75,86	-88,06	-75,64	-78,47	-87,97	-76,51
	El Prat	Punto 1	-87,58	-74,95	-87,45	-87,85	-87,90	-87,71	-79,32	-87,84	-87,87	-87,43	-80,18	-87,82	-78,00	-73,67	-87,50	-78,45
		Punto 2	-85,39	-66,46	-88,03	-87,95	-87,99	-82,91	-70,17	-87,84	-87,93	-87,92	-70,56	-87,90	-68,60	-67,94	-87,73	-67,59
		Punto 3	-87,63	-48,09	-82,85	-87,71	-87,95	-52,13	-49,94	-87,99	-87,68	-87,99	-55,87	-87,85	-61,59	-65,77	-86,83	-60,02
	Sant Feliu	Punto 1	-87,62	-77,49	-88,37	-88,25	-88,33	-86,51	-76,77	-88,35	-88,34	-87,90	-69,08	-88,27	-72,39	-73,53	-88,18	-74,74
		Punto 2	-87,96	-70,96	-87,84	-87,76	-87,91	-82,30	-75,71	-87,89	-87,83	-87,90	-78,32	-87,83	-78,81	-78,09	-87,32	-74,55
		Punto 3	-87,87	-67,69	-87,47	-87,13	-87,82	-71,91	-58,21	-87,72	-87,44	-87,66	-76,17	-87,74	-67,68	-72,90	-85,97	-72,29
	Sant Just Desvern	Punto 1	-87,56	-50,13	-86,47	-87,66	-87,89	-53,38	-55,20	-87,91	-87,04	-87,80	-70,38	-87,72	-66,39	-73,80	-87,24	-58,11
		Punto 2	-85,65	-74,94	-87,92	-87,89	-87,95	-87,46	-60,52	-87,97	-87,96	-87,93	-54,99	-87,92	-62,36	-61,06	-87,70	-73,56
	Hospitalet	Punto 1	-88,14	-59,03	-85,89	-88,03	-88,05	-55,77	-62,57	-88,13	-87,30	-87,64	-62,68	-87,92	-57,66	-51,18	-81,23	-59,36
		Punto 2	-87,85	-62,45	-86,99	-87,86	-88,01	-66,56	-67,41	-88,07	-87,60	-87,80	-62,90	-87,97	-63,01	-68,52	-78,18	-79,23
	Sant Vicens	Punto 1	-87,33	-75,10	-88,33	-88,26	-88,30	-87,87	-71,14	-88,25	-88,26	-88,09	-69,44	-88,16	-65,47	-69,56	-88,03	-77,38
		Punto 2	-87,72	-75,08	-87,85	-87,85	-87,91	-83,06	-78,42	-87,85	-87,84	-87,71	-80,60	-87,97	-78,23	-79,73	-87,73	-78,75
	Santa Coloma	Punto 1	-87,86	-70,55	-87,78	-87,81	-87,86	-76,56	-75,70	-87,87	-87,77	-87,80	-70,64	-87,77	-72,64	-66,15	-87,31	-76,98
		Punto 2	-87,26	-39,67	-87,12	-87,85	-87,86	-58,05	-51,77	-87,79	-87,23	-87,76	-52,45	-87,75	-54,09	-58,46	-87,32	-56,53
	Molins de Rei	Punto 1	-86,38	-84,58	-87,97	-87,85	-87,89	-87,77	-76,50	-87,91	-87,95	-87,89	-77,37	-87,81	-74,10	-72,97	-87,74	-81,05
		Punto 2	-88,07	-64,41	-87,30	-87,72	-87,95	-74,36	-72,65	-88,01	-87,29	-87,90	-67,64	-87,89	-75,35	-73,06	-87,08	-69,35
	Cornellá	Punto 1	-88,10	-71,42	-87,83	-87,92	-87,96	-72,41	-58,89	-87,97	-87,90	-87,72	-53,02	-87,93	-63,09	-55,74	-87,46	-70,42
	Sant Joan Despí	Punto 1	-88,08	-69,65	-88,14	-88,14	-88,25	-79,88	-74,27	-88,22	-88,14	-88,17	-76,72	-88,19	-73,32	-74,90	-87,94	-75,83

Canal ocupado cuando no debería	Canal ocupado en algunos puntos cuando no debería	Canal vacío cuando debería estar ocupado	Canal estatal	Canal autonómico	Canal local	TVWS

	CANAL		Canal 37	Canal 38	Canal 39	Canal 40	Canal 41	Canal 42	Canal 43	Canal 44	Canal 45	Canal 46	Canal 47	Canal 48	Canal 49	Canal 50	Canal 51	Canal 52
	RANGO FRECUENCIAL (MHz)		598-606	606-614	614-622	622-630	630-638	638-646	646-654	654-662	662-670	670-678	678-686	686-694	694-702	702-710	710-718	718-726
	TEÓRICO																	
	RESUMEN																	
MUNICIPIOS	Sant Boi	Punto 1	-87,78	-87,77	-87,67	-87,75	-87,73	-87,71	-87,61	-76,48	-87,30	-87,71	-78,56	-81,97	-87,74	-87,72	-87,70	-87,63
		Punto 2	-87,89	-87,93	-87,87	-87,80	-87,85	-87,87	-87,65	-71,09	-87,73	-87,81	-76,43	-73,30	-87,75	-87,78	-87,62	-87,75
		Punto 3	-87,91	-87,94	-87,96	-87,86	-87,80	-87,85	-87,74	-80,13	-87,76	-87,84	-83,73	-82,23	-87,77	-87,79	-87,70	-87,66
		Punto 4	-87,77	-87,81	-87,43	-87,59	-87,74	-87,75	-87,45	-61,18	-87,25	-87,62	-64,27	-72,08	-87,49	-87,76	-87,51	-87,65
	Esplugas	Punto 1	-87,72	-88,04	-87,64	-87,31	-88,00	-88,00	-88,00	-66,46	-87,01	-87,92	-72,64	-76,17	-87,95	-87,89	-87,66	-87,86
		Punto 2	-87,92	-87,98	-87,90	-87,89	-87,80	-87,92	-87,81	-71,50	-87,82	-87,94	-72,21	-75,08	-87,89	-87,88	-87,79	-87,82
		Punto 3	-87,92	-87,97	-87,89	-87,90	-87,90	-87,95	-87,84	-80,24	-87,78	-87,82	-85,24	-77,57	-87,87	-87,88	-87,76	-87,81
		Punto 4	-87,91	-88,01	-87,59	-87,88	-87,82	-87,96	-87,86	-72,17	-87,19	-87,84	-76,38	-86,53	-87,73	-87,75	-85,81	-87,73
	El Prat	Punto 1	-87,62	-87,81	-87,31	-87,66	-87,65	-87,70	-87,71	-77,90	-85,95	-87,59	-78,56	-87,58	-87,61	-87,71	-87,51	-87,66
		Punto 2	-87,73	-87,72	-87,33	-87,69	-87,66	-87,67	-87,66	-72,74	-86,50	-87,75	-71,81	-85,98	-87,61	-87,67	-87,61	-87,61
		Punto 3	-87,82	-87,84	-78,10	-87,77	-87,79	-87,84	-86,72	-61,10	-81,09	-87,81	-69,37	-73,65	-87,81	-87,73	-87,78	-87,72
	Sant Feliu	Punto 1	-88,19	-88,23	-87,81	-88,10	-88,15	-88,22	-88,15	-70,96	-86,45	-88,08	-72,63	-85,82	-88,02	-87,99	-87,84	-88,00
		Punto 2	-87,78	-87,78	-87,76	-87,77	-87,74	-87,75	-87,66	-73,93	-87,52	-87,63	-73,83	-80,03	-87,70	-87,71	-87,61	-87,65
		Punto 3	-87,67	-87,74	-87,29	-87,63	-87,65	-87,72	-87,34	-73,52	-87,21	-87,65	-74,15	-67,61	-87,58	-87,59	-87,51	-87,54
	Sant Just Desvern	Punto 1	-87,83	-87,93	-83,25	-87,85	-87,88	-87,91	-84,86	-50,06	-83,65	-87,87	-70,77	-67,82	-87,77	-87,80	-87,74	-87,77
		Punto 2	-87,85	-87,88	-87,42	-87,83	-87,76	-87,82	-87,80	-65,63	-85,24	-87,61	-59,49	-85,85	-87,69	-87,80	-87,52	-87,72
	Hospitalet	Punto 1	-87,89	-87,96	-87,72	-87,88	-87,93	-87,86	-87,25	-57,14	-87,08	-87,86	-55,00	-52,86	-87,88	-87,84	-87,75	-87,76
		Punto 2	-87,83	-87,96	-87,80	-87,82	-87,81	-87,85	-85,21	-67,43	-87,55	-87,74	-70,74	-68,86	-87,77	-87,73	-87,59	-87,73
	Sant Vicens	Punto 1	-88,11	-88,11	-87,49	-88,01	-87,95	-88,05	-87,97	-71,41	-76,06	-87,22	-60,55	-87,44	-87,92	-87,85	-87,82	-87,84
		Punto 2	-87,85	-87,88	-87,78	-87,77	-87,80	-87,85	-87,79	-78,48	-87,73	-87,73	-81,52	-83,95	-87,76	-87,78	-87,76	-87,70
	Santa Coloma	Punto 1	-87,75	-87,72	-86,98	-87,66	-87,69	-87,75	-87,62	-69,61	-86,93	-87,68	-74,12	-84,37	-87,61	-87,63	-87,54	-87,58
		Punto 2	-87,68	-87,73	-83,75	-87,65	-87,72	-87,68	-87,16	-47,61	-83,19	-87,63	-60,04	-67,52	-87,59	-87,67	-87,56	-87,63
	Molins de Rei	Punto 1	-87,77	-87,79	-87,64	-87,63	-87,62	-87,76	-87,67	-77,08	-85,28	-87,51	-72,54	-87,62	-87,65	-87,67	-87,69	-87,64
		Punto 2	-87,87	-87,85	-87,81	-87,77	-87,76	-87,76	-87,29	-71,31	-87,68	-87,72	-73,72	-75,41	-87,76	-87,72	-87,66	-87,64
	Cornellá	Punto 1	-87,83	-87,89	-87,80	-87,75	-87,83	-87,79	-87,73	-66,71	-87,72	-87,78	-59,45	-77,21	-87,75	-87,75	-87,64	-87,70
	Sant Joan Despí	Punto 1	-88,05	-88,13	-88,01	-88,00	-88,01	-88,06	-87,86	-73,20	-87,70	-87,99	-76,77	-80,48	-88,01	-87,97	-87,80	-87,82

Canal ocupado cuando no debería	Canal ocupado en algunos puntos cuando no debería	Canal vacío cuando debería estar ocupado	Canal estatal	Canal autonómico	Canal local	TVWS

	CANAL		Canal 53	Canal 54	Canal 55	Canal 56	Canal 57	Canal 58	Canal 59	Canal 60	Canal 61	Canal 62	Canal 63	Canal 64	Canal 65	Canal 66	Canal 67	Canal 68	Canal 69
	RANGO FRECUENCIAL (MHz)		726-734	734-742	742-750	750-758	758-766	766-774	774-782	782-790	790-798	798-806	806-814	814-822	822-830	830-838	838-846	846-854	854-862
	TEÓRICO																		
	RESUMEN																		
MUNICIPIOS	Sant Boi	Punto 1	-87,65	-87,60	-87,60	-87,52	-87,50	-87,57	-87,48	-87,56	-79,21	-87,47	-87,54	-76,38	-87,51	-87,47	-76,88	-79,17	-79,06
		Punto 2	-87,68	-87,75	-87,72	-87,69	-86,74	-87,55	-87,63	-87,67	-74,03	-87,65	-87,70	-73,38	-87,65	-87,63	-69,10	-74,60	-76,16
		Punto 3	-87,70	-87,72	-87,68	-87,65	-87,27	-87,59	-87,59	-87,67	-78,26	-87,61	-87,70	-82,93	-87,65	-87,65	-77,69	-83,91	-84,87
		Punto 4	-87,63	-87,69	-87,66	-87,61	-87,34	-87,64	-87,18	-87,60	-51,47	-87,58	-87,66	-56,51	-87,65	-87,57	-66,61	-65,14	-67,49
	Esplugas	Punto 1	-87,81	-87,78	-87,69	-87,63	-86,42	-87,78	-85,84	-87,71	-69,64	-87,68	-87,76	-70,94	-87,77	-87,73	-72,10	-71,19	-70,64
		Punto 2	-87,77	-87,68	-87,80	-87,76	-83,35	-87,74	-87,69	-87,77	-71,35	-87,76	-87,77	-71,99	-87,75	-85,70	-73,67	-75,45	-77,94
		Punto 3	-87,80	-87,81	-87,74	-87,77	-87,77	-87,77	-87,74	-87,69	-77,53	-87,69	-87,67	-77,74	-87,68	-87,66	-82,21	-80,32	-85,25
		Punto 4	-87,72	-87,75	-87,70	-87,75	-87,74	-87,71	-87,70	-87,78	-71,62	-87,77	-87,74	-76,50	-87,72	-87,67	-74,19	-75,76	-76,28
	El Prat	Punto 1	-87,63	-87,60	-87,61	-87,55	-87,54	-87,54	-87,45	-87,57	-79,84	-87,52	-87,52	-78,88	-87,54	-87,54	-81,97	-81,43	-80,50
		Punto 2	-87,60	-87,53	-87,56	-87,62	-87,57	-87,55	-87,60	-87,48	-75,15	-86,87	-86,49	-74,95	-87,30	-87,49	-73,31	-75,20	-77,38
		Punto 3	-87,75	-87,74	-87,70	-87,75	-87,69	-87,67	-87,67	-87,61	-52,08	-87,64	-87,66	-55,08	-87,59	-87,57	-58,83	-57,80	-58,02
	Sant Feliu	Punto 1	-87,95	-87,94	-87,94	-87,92	-87,90	-87,97	-87,89	-87,91	-69,23	-87,81	-87,87	-72,86	-87,89	-87,80	-75,95	-73,29	-72,18
		Punto 2	-87,58	-87,63	-87,57	-87,57	-87,59	-87,56	-87,53	-87,58	-75,64	-87,56	-87,58	-76,52	-87,54	-87,50	-76,29	-75,80	-77,90
		Punto 3	-87,57	-87,54	-87,51	-87,47	-87,51	-87,50	-87,44	-87,53	-75,10	-87,45	-87,47	-74,35	-87,45	-87,45	-77,51	-74,41	-75,18
	Sant Just Desvern	Punto 1	-87,73	-87,74	-87,74	-87,68	-87,71	-87,74	-87,68	-87,65	-57,86	-87,68	-87,70	-69,48	-87,70	-87,62	-57,82	-65,13	-62,63
		Punto 2	-87,70	-87,71	-87,67	-87,69	-87,64	-87,66	-87,69	-87,65	-47,31	-87,63	-87,65	-49,00	-87,60	-87,53	-59,12	-54,75	-65,45
	Hospitalet	Punto 1	-87,74	-87,77	-87,72	-87,73	-72,43	-87,68	-87,72	-87,74	-51,12	-87,69	-87,71	-46,32	-87,69	-87,67	-55,00	-50,61	-53,83
		Punto 2	-87,74	-87,72	-87,60	-87,66	-83,00	-86,78	-87,43	-87,53	-64,04	-87,52	-87,64	-59,00	-87,56	-87,60	-72,88	-70,77	-69,69
	Sant Vicens	Punto 1	-87,85	-87,82	-87,71	-87,74	-87,69	-87,75	-87,68	-87,71	-74,17	-87,82	-87,75	-73,60	-87,70	-87,70	-73,51	-73,26	-71,73
		Punto 2	-87,68	-87,67	-87,67	-87,66	-87,63	-87,66	-87,66	-87,63	-72,71	-87,62	-87,50	-78,38	-87,65	-87,65	-82,05	-80,30	-80,24
	Santa Coloma	Punto 1	-87,65	-87,56	-87,58	-87,59	-87,59	-87,61	-87,56	-87,57	-75,13	-87,52	-87,59	-78,04	-87,54	-87,45	-78,31	-80,91	-81,80
		Punto 2	-87,61	-87,61	-87,63	-87,56	-87,60	-87,55	-87,49	-87,53	-46,67	-87,53	-87,43	-48,70	-87,49	-87,46	-47,31	-53,80	-58,21
	Molins de Rei	Punto 1	-87,65	-87,61	-87,64	-87,61	-87,64	-87,64	-87,63	-87,63	-74,08	-87,60	-87,63	-80,36	-87,55	-87,55	-80,65	-78,79	-80,76
		Punto 2	-87,71	-87,69	-87,68	-87,63	-87,61	-87,62	-87,59	-87,60	-67,80	-87,55	-87,54	-69,19	-87,52	-87,49	-73,60	-73,60	-73,68
	Cornellá	Punto 1	-87,70	-87,65	-87,64	-87,68	-87,58	-87,61	-87,55	-87,65	-62,15	-87,58	-87,64	-63,78	-87,62	-87,54	-61,08	-60,84	-62,13
	Sant Joan Despí	Punto 1	-87,85	-87,90	-87,84	-87,83	-87,80	-87,80	-87,76	-87,74	-74,82	-87,76	-87,81	-75,33	-87,80	-87,79	-77,23	-70,03	-76,25

Canal ocupado cuando no debería	Canal ocupado en algunos puntos cuando no debería	Canal vacío cuando debería estar ocupado	Canal estatal	Canal autonómico	Canal local	TVWS

En esta tabla 8 se detallan entre otros datos todas las potencias obtenidas por canal para cada uno de los puntos anteriormente mencionados. Asimismo, se muestran otros datos que pasamos a explicar a continuación:

- Canal : Indica el número del canal
- Rango frecuencial: Indica la frecuencia inicial y la final del canal (en MHz)
- Teórico: Expresa mediante un color la teórica ocupación del canal, a saber
    - Rojo: Canal Estatal
    - Azul: Canal Autonómico
    - Verde: Canal Local
    - Blanco: Canal vacío
- Resumen : Expresa mediante un color la real ocupación del canal, a saber:
    - Rojo: Canal Estatal
    - Azul: Canal Autonómico
    - Verde: Canal Local
    - Rosa: Canal ocupado cuando debería estar libre
    - Amarillo: Canal ocupado en alguno de los puntos medidos cuando debería haber estado libre en todos
    - Gris: Canal vacío cuando realmente debería haber estado ocupado por un canal local (bastante lógico debido a que no se deberían detectar como ocupados canales locales de la zona norte de Barcelona) (TVWS local)
    - Lila: Canal que después de realizar el procesado de los datos se encuentran vacíos tal y como se esperaba. (TVWS)

A partir de esta tabla resumen de los datos ya procesados podemos extraer una serie de conclusiones básicas que reflejan el estado del espectro en la zona sud del área metropolitana de Barcelona:

- De los 49 canales disponibles, solo 15 de ellos se hallan ocupados en la inmensa mayoría de los puntos medidos.
- De esos 15, solamente dos de ellos, el canal 22 y el canal 36 se hallan ocupados cuando no deberían estarlo.
- Hay que tener en cuenta que no todos los servicios tienen los mismos requerimientos de ancho de banda y que por tanto según el servicio las necesidades de espectro serán mayores o menores. En el 90% de los puntos medidos encontramos un TVWS comprendido entre los canales 49 y 60 ambos incluidos. En todos los puntos medidos se han detectado entre 31 y 36 TVWS lo que significa que el 63,2% - 73,4% del espectro se encuentra vacío en la zona de estudio, es decir, hay mucho espectro en desuso.
- Hospitalet es el municipio que tiene menos TVWS con un promedio de 32 entre sus dos puntos medidos. Este dato es algo muy lógico teniendo en cuenta su proximidad geográfica a la ciudad de Barcelona y el hecho de que algunos de los canales locales transmitan directamente desde el mismo municipio de Hospitalet.

5.4. Análisis de canales no oficiales

En este punto se pretende analizar los canales conflictivos, es decir, aquellos canales que se hayan encontrado ocupados cuando en teoría deberían haber estado vacíos.

5.4.1. Canales ocupados en todos los puntos

Los canales que se encuentran ocupados en la inmensa mayoría de los puntos medidos cuando no deberían son el 22 y el 36.

5.4.1.1. Canal 22

Este canal lo encontramos ocupado en la mayoría de los puntos medidos cuando en teoría debería ser un canal desocupado. Según la información hallada en [10] la compañía Abertis habría empezado a realizar retransmisiones de pruebas de ultra definición, también conocido como 4k, un nuevo sistema que duplica la calidad de la imagen, en el canal 22. Por lo tanto podemos asumir que el hecho de que este canal se encuentre ocupado es debido a la emisión en pruebas de Abertis.

5.4.1.2. Canal 36

Este canal también lo encontramos ocupado casi en la totalidad de los puntos medidos. Según [11] , el múltiple local de Cornellà del Llobregat sufrió un cambio de canal entre el 36 y el 53. Puesto que en nuestras medidas hemos encontrado el canal 53 desocupado debemos entender que se estaba emitiendo a través del 36.

5.4.2. Canales ocupados en algunos puntos medidos

Hay canales que se han encontrado ocupados en algunos municipios mientras que en otros estaban vacíos. Los canales son los siguientes: 23, 26, 35, 39, 45, 48, 57

5.4.2.1. Canal 23

Este canal se encuentra ocupado en el punto 3 medido en el Prat. Según [12], se duplicaron las señales emitidas en la última zona de la banda de Televisión. Más concretamente se duplicaron las emisiones de los canales 66, 67, 68 y 69 a los canales 23, 29, 41 y 43. Para estos 4 canales, solo hemos detectado ocupado el canal 23 en el punto mencionado anteriormente. Esto es debido a que la emisión de estos canales está orientada hacia la zona del Maresme, es decir, la zona norte de Barcelona. Al ser el punto 3 del Prat una zona bastante cercana a Barcelona y con muy pocos obstáculos alrededor (Polígono industrial de edificios con poca altura) se ha llegado a detectar con muy poca potencia este canal como ocupado.

5.4.2.2. Canal 26

Este canal lo hemos encontrado ocupado en más del 75% de los puntos medidos. Según [13], por este canal se emite un múltiple local de Barcelona pero con baja potencia, por ese motivo no lo encontramos ocupado en algunos de los puntos más lejanos a la ciudad de Barcelona como Sant Vicens o Molins de Rei.

5.4.2.3. Canal 35

Este canal lo encontramos ocupado únicamente en los 2 puntos realizados en Hospitalet. Según [14], a través de este múltiplo se emite el canal local de Vic antes de pasar al 50. También se ha encontrado información extraoficial que dice que el Canal Córdoba

internacional , una emisión pirata de TDT [15]se emitía en Barcelona a través de este múltiplo.

5.4.2.4. Canal 39

Este canal lo encontramos ocupado solamente en 3 de los puntos medidos. Esto es debido a que a través de este múltiple se transmite el canal local de Sabadell. La distancia geográfica que hay entre Sabadell y la zona de estudio explica que se halle ocupado en un número escaso de puntos.

5.4.2.5. Canal 45

El caso de este canal es paralelo al del canal 39 ya que a través de este múltiplo se transmite también un canal local de Sabadell. Este canal lo encontramos ocupado en 4 de los puntos medidos, siendo 3 de ellos los mismos que se encontraban ocupados para el canal 39.

5.4.2.6. Canal 48

Este canal lo encontramos ocupado en la mayoría de los puntos en los que hemos realizado medidas. El caso de este canal es paralelo al del canal 26, ya que a través del múltiplo 48 también se emite un canal de Barcelona por lo que los resultados para los canales 26 y 48 son muy similares.

5.4.2.7. Canal 57

Este canal lo encontramos ocupado únicamente en el municipio de Hospitalet y en uno de los puntos de Esplugas. No se ha hallado ninguna información relacionada a la emisión en este múltiplo.

5.5. Tabla resumen de canales no oficiales

A continuación se muestra una tabla 9 que recoge cada uno de los canales que se han encontrado ocupados de forma no oficial expresando para cada uno cual es el motivo por el cual lo estaban.

CANAL	RAZÓN
22	Canal de pruebas de Abertis
35,36	Cambio de múltiple
23	Duplícado de canal
26,39,45,48	Canales locales de otras zonas
57	Señal sin identificar

Tabla 9. TABLA RESUMEN CANALES NO OFICIALES

6. Conclusiones

Tal y como estimábamos al principio de este documento, el espectro radioeléctrico es un medio escaso e infrautilizado. Gracias a Cognitive Radio, en un futuro no muy lejano, podremos mejorar tanto el rendimiento que le damos al espectro como la cantidad de usuarios a los que podemos dar servicio simultáneamente.

No obstante, esto se plantea como una misión imposible si no somos capaces de identificar primero la ocupación que tiene cada una de las zonas del espectro. Como hemos explicado a lo largo de la memoria, la banda de la TDT es una de las mejores candidatas para llevar a cabo una primera aproximación para desarrollar e implantar los sistemas de Cognitive Radio dado al paso de la televisión analógica a la digital y al estático de la banda como a sus buenas condiciones de propagación.

El objetivo principal de este proyecto era estudiar la ocupación del espectro radioeléctrico en la zona sud del Area Metropolitana de Barcelona (AMB) realizando una serie de medidas en la zona geográfica especificada para la futura construcción de un “Radio Environment Map” (REM) que sirva como plantilla a la hora de implementar los sistemas de Cognitive Radio en la zona en cuestión.

Hay varios datos que demuestran que el espectro radioeléctrico está claramente infrautilizado en la banda de televisión como pueden ser los 31-36 TV White Spaces que hay en cada uno de los puntos medidos o el hecho de que documentos oficiales aseguren que ciertos canales deberían estar ocupados cuando no lo están o a la inversa. A la hora de construir un “Radio Environment Map” debemos cerciorarnos de que la ocupación espectral que especificamos en él es la correcta, que como hemos podido comprobar a lo largo de este documento no siempre coincide con la oficial. Recordamos una vez más que el objetivo de Cognitive Radio es poder dar servicio a usuarios sin licencia sin impedir el servicio de los usuarios con licencia.

Asimismo, cabe destacar que una vez construido el “Radio Environment Map”, éste deberá ser actualizado periódicamente para actualizar la ocupación de cada

uno de los canales en cada ubicación geográfica. De mismo modo, se recomienda en la medida de lo posible, expandir este “Radio Environment Map” lo máximo posible para que la implementación de los sistemas de Cognitive Radio sea más fácil y rápida.

Hay pocas cosas en cuestión de tecnología que tengamos la certeza de que van a ocurrir, pero lo que podemos garantizar es que la demanda de espectro radioeléctrico y Cognitive Radio van a dar mucho que hablar durante los próximos años.

7. Referencias

[1] http://www.neoteo.com/20011-el-futuro-de-la-telefonia-movil-la-radio/

[2] http://www.dvb.org/resources/public/factsheets/DVB-T_Factsheet.pdf

[3]http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/RadioTV/TD/Paginas/TD.aspx

[4] http://www.hindawi.com/journals/ijdmb/2010/236568/

[5] http://www.televisiondigital.gob.es/DividendoDigital/Paginas/que-es-dividendo-digital.aspx

[6] https://www.itu.int/ITU-D/finance/work-cost-tariffs/events/tariff-seminars/elsalvador/pdf/Sesion10_Impacto_Economico_JAvila.pdf

[7] http://www.eham.net/reviews/detail/6659

[8] http://www.anritsu.com/en-US/Products-Solutions/Products/MS2721B.aspx

[9] http://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB

[10]https://www.cellnextelecom.com/content/uploads/2015/04/4K_apuesta_futuro_TDT.pdf

[11]http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/RadioTV/TD/Digital/Demarcaciones%20TD%20local/DemarcacionesTDCataluna.pdf

[12] http://www.antenasdigital.es/noticias.php?id_noticia=37

[13]http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/RadioTV/TD/Digital/Demarcaciones%20TD%20local/DemarcacionesTDCataluna.pdf

[14]http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/RadioTV/TD/Digital/Demarcaciones%20TD%20local/DemarcacionesTDCataluna.pdf

[15] http://almeria.fape.es/canales-religiosos-ocupan-ilegalmente-frecuencias-libres-de-tdt-en-andalucia/

7.1. Referencias complementarias

[1] 11410-00412D_Spectrum Master Brochure.pdf

[2] ANRITSU Spectrum Analyzer.pdf

[3] LTE in Europe TVWS.pdf

[4] Mitola_III_Cognitive Radio.pdf

[5] Nekovee_journal2010.pdf

[6] Secondary Spectrum Trading in TV White Spaces_Hanna Bogucka.pdf

[7] Survey CR Akyildiz 2.pdf

[8] TV White Spaces in Europe _Mwangoka.pdf