PROYECTO FINAL DE CARRERA

Ingeniería Superior de Telecomunicaciones

MEDIDAS PARA CREAR Y VALIDAR UN REM (*RADIO ENVIRONMENT MAP*) DE TV *WHITE SPACES*

(MEASURES TO CREATE AND VALIDATE A REM OF TV WHITE SPACES)

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunciació de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

Autor: Xavier Pintor Villarroya

Directora: Anna Umbert Juliana

Fecha: Febrero 2015

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado y me han acompañado tanto en la realización de este proyecto como en estos años de carrera haciéndola una etapa de mi vida muy especial. Especialmente:

A mi tutora Anna que desde el primer momento me inspiró confianza para afrontar este proyecto y por el apoyo incondicional mostrado en todo este tiempo, siempre dispuesta dar consejos para mejorar este proyecto. También me gustaría agradecer a Sergio su predisposición de echar una mano en todo momento.

A mi familia por todo el apoyo mostrado en estos más de cinco años. En especial a mis padres por estar siempre ahí cuando más se los necesita y que sin ellos todo esto no hubiera sido posible.

Y por último a ti, que aunque últimamente estés lejos siempre te he sentido muy cerca y me has permitido seguir adelante con tus ánimos.

Resumen

Debido a la gran demanda existente de servicios inalámbricos de banda ancha y la aparente escasez que existe actualmente de espectro, se han llevado a cabo campañas de medidas en los últimos años para conocer la ocupación real del espectro y se ha observado que una gran cantidad se encuentra infrautilizado. A raíz de esto han surgido varias ideas para conseguir una mejor eficiencia en el uso del espectro y para aprovechar las partes que puedan estar inutilizadas. Una de ellas es la tecnología *Cognitive Radio* (CR), la cual permite hacer un uso secundario del espectro no utilizado siempre y cuando no se perjudique a los usuarios primarios, cambiando los parámetros radio en función del conocimiento que adquiere de su entorno. Una de las mejores bandas espectrales para llevar a cabo las redes *Cognitive Radio* (CRN) es la banda dedicada a la televisión (470-790 MHz), ya que dispone de muchos huecos espectrales sin utilizar, denominados *TV White Spaces,* debido a la evolución de la televisión analógica a la televisión digital. Para facilitar la detección de las partes del espectro inutilizadas a las CRN, aparece el concepto de *Radio Environment Map* (REM), el cual es una base de datos inteligente que almacena información actualizada sobre la ocupación espectral del entorno. Los dispositivos CR, a partir de su localización, pueden consultar el REM para conocer qué partes del espectro están libres para poder operar en ese instante.

Visto todo el potencial que ofrece un REM para la implementación de la tecnología *Cognitive Radio* y las oportunidades que brinda el espectro televisivo, desde este proyecto se ha llevado a cabo la construcción de un REM de *TV White Spaces* en el Área Metropolitana de Barcelona (AMB).

El REM se ha construido a partir de puntos nodales previamente medidos en la zona norte del AMB y algoritmos de interpolación. Los algoritmos de interpolación permiten estimar el valor de todos aquellos puntos que no han sido medidos y se encuentran dentro del escenario implementado en el REM. Para realizar la estimación se han implementado diferentes algoritmos de interpolación, entre ellos el algoritmo de interpolación *Kriging*. Se ha hecho un énfasis especial en este algoritmo de interpolación para conocer y validar el rendimiento que ofrece la implementación de un REM mediante este algoritmo en la banda espectral dedicada a la televisión.

Resum

A causa de la gran demanda existent de serveis sense fils de banda ampla i l'aparent escassetat que hi ha actualment d'espectre, s'han dut a terme campanyes de mesures en els últims anys per conèixer l'ocupació real de l'espectre i s'ha observat que una gran quantitat es troba infrautilitzat. Arran d'això han sorgit diverses idees per aconseguir una millor eficiència en l'ús de l'espectre i per aprofitar les parts que puguin estar inutilitzades. Una d'elles és la tecnologia *Cognitive Radio* (CR), la qual permet fer un ús secundari de l'espectre no utilitzat sempre que no es perjudiqui als usuaris primaris, canviant els paràmetres ràdio en funció del coneixement que adquireix del seu entorn. Una de les millors bandes espectrals per dur a terme les xarxes Cognitive Radio (CRN) és la banda dedicada a la televisió (470-790 MHz), ja que disposa de molts forats espectrals sense utilitzar, denominats TV White Spaces, a causa de l'evolució de la televisió analògica a la televisió digital. Per a facilitar la detecció de les parts de l'espectre inutilitzades a les CRN, apareix el concepte de *Radio Environment Map* (REM), el qual és una base de dades intel·ligent que emmagatzema informació actualitzada sobre l'ocupació espectral de l'entorn. Els dispositius CR, a partir de la seva localització, poden consultar el REM per conèixer quines parts de l'espectre estan lliures per poder operar en aquest instant.

Vist tot el potencial que ofereix un REM per a la implementació de la tecnologia Cognitive Radio i les oportunitats que ofereix l'espectre televisiu, des d'aquest projecte s'ha dut a terme la construcció d'un REM de TV White Spaces a l'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB).

El REM s'ha construït a partir de punts nodals prèviament mesurats a la zona nord de l'AMB i algoritmes d'interpolació. Els algoritmes d'interpolació permeten estimar el valor de tots aquells punts que no han estat mesurats i es troben dins de l'escenari implementat en el REM. Per realitzar l'estimació s'han implementat diferents algoritmes d'interpolació, entre ells l'algoritme d'interpolació *Kriging*. S'ha fet un èmfasi especial en aquest algoritme d'interpolació per conèixer i validar el rendiment que ofereix la implementació d'un REM mitjançant aquest algoritme a la banda espectral dedicada a la televisió.

Abstract

Due to the great existing demand for wireless broadband and the apparent scarcity that there is in the present spectrum, several measurement campaigns have been carried out in the last few years to know the current occupation of the spectrum and it has been observed that there is a lot of underutilized spectrum. As a result of this, it have come up with several ideas to improve efficiency in the use of the spectrum and to take advantage of parts that may be unused. One of them is the Cognitive Radio (CR) technology, which allows us to do a secondary use of unused spectrum as long as it does not prejudice primary users, changing radio parameters based on the knowledge acquired from the environment. One of the best spectral bands to perform Cognitive Radio Networks (CRN) is the band dedicated to television (470-790 MHz), since it has many spectral holes without being used, called TV White Spaces, due to the evolution of analogue television to digital television. To make the detection of unused parts of the spectrum easier for CRN, the concept of Radio Environment Map (REM) appears, which is an intelligent database which stores up-to-date information of spectral occupation. CR devices, based on their location, can query the REM to know the parts of the spectrum that are free to operate at that moment.

Once having seen all the potential offered by a REM for the implementation of Cognitive Radio technology and the opportunities provided by the television spectrum, in this project it has been carried out the construction of a REM of TV White Spaces in the Metropolitan Area of Barcelona (AMB).

The REM has been built from nodal points measured previously in the northern part of the AMB and interpolation algorithms. Interpolation algorithms allows us to estimate the value of all those points which have not been measured and are within the scenario implemented in REM. To carry out the estimation have been implemented several interpolation algorithms, including the *Kriging* interpolation algorithm. A special emphasis on this interpolation algorithm has been done to know and validate the performance offered by this algorithm to create a REM in the spectral band dedicated to television.

Índice de contenido

AGRADECIMIENTOS **1**

RESUMEN **3**

RESUM **5**

ABSTRACT **7**

ÍNDICE DE CONTENIDO **9**

ÍNDICE DE FIGURAS **12**

ÍNDICE DE TABLAS **15**

1. INTRODUCCIÓN **17**

1.1 Contexto del proyecto **17**

1.2 Objetivo **18**

1.3 Estructura de la memoria **19**

2. MARCO REFERENCIAL **21**

2.1 *Cognitive Radio* **21**

2.1.1 Introducción a la *Cognitive Radio* 21

2.1.2 Características: Capacidad Cognitiva y Reconfiguración 22

2.1.3 Arquitectura de red de las *Cognitive Radio* 23

2.1.3.1 Componentes de la red 24

2.1.3.2 Requisitos de las *Cognitive Radio* 25

2.1.3.4 Bandas de operación y tipos de acceso a la red 26

2.1.3.5 Proceso gestión del espectro 27

2.1.3.6 Detección del espectro 28

2.1.4 *Radio Environment Map* en redes de *Cognitive Radio* 30

2.2 Televisión Digital terrestre (TDT) **31**

2.2.1 Introducción a la TDT 31

2.2.2 Características y beneficios de la TDT 31

2.2.3 Dividendo Digital 33

2.2.3.1 Antecedentes del Dividendo Digital 34

2.2.3.2 Situación actual Dividendo Digital 35
2.2.4 Canales de TDT en la provincia de Barcelona 35
2.2.4.1 Múltiples de cobertura estatal 36
2.2.4.2 Múltiples de cobertura autonómica 38
2.2.4.3 Múltiples de cobertura local 39

2.3 TV *White Spaces* 40
2.3.1 Oportunidades de la banda espectral de TV 41
2.3.2 Aplicaciones de los TV *White Spaces* 41

3. ALGORITMOS DE INTERPOLACIÓN PARA LA CREACIÓN DE UN REM 43

3.1 Técnicas para la creación de un REM 43

3.2 Algoritmos de Interpolación (A.I) 47
3.2.1 Algoritmo de Interpolación *Nearest Neighbor* 47
3.2.2 Algoritmo de Interpolación *Inverse Distance Weighted* 48
3.2.3 Algoritmo de Interpolación *Kriging* 49
3.2.3.1 *Kriging* ordinario 50

3.3 Interpolación geográfica 53
3.3.1 Coordenadas geográficas: latitud y longitud 53
3.3.2 Coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*): (x,y) 54

4. INSTRUMENTACIÓN Y CAMPAÑA DE MEDIDAS 58

4.1 Equipo y esquema de medidas 58
4.1.1 Esquema de medidas 58
4.1.2 Analizador de espectros 59
4.1.3 Antena 59
4.1.4 Filtro elimina banda 60
4.1.5 GPS 61
4.1.6 Portátil con el programa Matlab 62
4.1.7 Cables y conectores 62

4.2 Metodología de medición 62
4.2.1 Configuración de los equipos 63
4.2.2 Procedimiento medición 64
4.2.3 Almacenamiento de datos 65

4.3 Medidas para la construcción del REM 65
4.3.1 Planificación del escenario de medidos 65
4.3.2 Procedimiento medición en entorno real 70

5. CONSTRUCCIÓN DEL REM DE *TV WHITE SPACES* 74

5.1 Cálculo umbral de decisión 74

5.2 Estructura de datos del REM 77

5.3 Procesado para la construcción del REM 79

5.3.1 Consideraciones previas 79

5.3.2 Punto NODAL 79

5.3.3 Punto *KRIGING* 81

6. VALIDACIÓN DEL REM DE TV *WHITE SPACES* Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS 86

6.1 Error en la estimación del A.I *Kriging* 86

6.1.1 Impacto del radio del A.I *Kriging* 86

6.1.2 Error absoluto por canal 90

6.3 Comparación A.I: *Kriging* y *Nearest Neighbor* 92

6.3.1 Según RMSE 93

6.3.2 Según detección TVWS 95

6.2 Comparación A.I: *Kriging* y *Inverse Distance Weighted* (IDW) 104

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS 107

8. BIBLIOGRAFÍA 111

Índice de figuras

Figura 1. Situación actual de congestión y las ventajas de utilizar la *Cognitive Radio* 22
Figura 2. Concepto de *spectrum hole* 23
Figura 3. Diseño del transceptor de las *cognitive radio* 23
Figura 4. Arquitectura de la red de *Cognitive Radio* 25
Figura 5. Ciclo cognitivo 27
Figura 6. Problema interferencia al receptor primario 28
Figura 7. Problema terminal oculto 29
Figura 8. Parte del espectro dedicado a la TDT (en verde) y parte del espectro dedicada al Dividendo Digital (en rojo) con sus respectivos canales. 32
Figura 9. Mapa de los estándares de televisión utilizados en los diferentes países 33
Figura 10. Evolución de las atribuciones de la parte del espectro destinada a la televisión 35
Figura 11. Distribución de los operadores en los diferentes múltiples 37
Figura 12. Distribución de los operadores en los diferentes múltiples anterior a la liberación del Dividendo Digital 37
Figura 13. Canales de televisión que se emiten en cada múltiple estatal 38
Figura 14. Canales de televisión que se emiten por el múltiple MAUT 39
Figura 15. Canales de televisión que se emiten por el múltiple MAUTP 39
Figura 16. Esquema funcionamiento REM de TVWS 43
Figura 17. Esquema construcción del REM mediante algoritmos de interpolación y su posterior funcionamiento 44
Figura 18. Ejemplo interpolación 45
Figura 19. Estimación del REM mediante A.I IDW y A.I *Kriging* y comparación con el REM real 46
Figura 20. Ejemplo interpolación mediante A.I *Nearest Neighbor* 47
Figura 21. Ponderación en función del parámetro p y la distancia al punto nodal 48
Figura 22. Comparación A.I *Kriging* y A.I IDW 49
Figura 23. Semivariograma esférico 51
Figura 24. Matriz de covarianza 52
Figura 25. Vector de covarianza 52
Figura 26. Vector lambda 52
Figura 27. Proyección plana 54
Figura 28. Sistema de coordenadas UTM 55
Figura 29. Esquema de medidas 58
Figura 30. Anritsu Handheld Spectrum Anlyzer MS2721B 59
Figura 31. Antena discono AOR DN753 60
Figura 32. Filtro elimina banda Mini Circuits NSBP-108+ 60
Figura 33. Principales interferencias debido a señales FM 61

Figura 34. Garmin GPS 18x USB 61

Figura 35. Portátil con el programa Matlab 62

Figura 36. Montaje equipos de medida 64

Figura 37. Esquema de puntos realizado por el anterior proyectista 66

Figura 38. Puntos medidos con anterioridad por el anterior proyectista en la región de Badalona y alrededores y que se volvieron a repetir 67

Figura 39. Puntos nodales en la región de Badalona y alrededores 68

Figura 40. Ubicación punto Validación 1 68

Figura 41. Ubicación punto Validación 2 69

Figura 42. Ubicación punto Validación 3 69

Figura 43. Escenario global a medir de los puntos nodales y de los puntos de validación 70

Figura 44. Montaje realizado en el punto de medida 71

Figura 45. Montaje realizado en el punto de medida 71

Figura 46. Comparación potencia por canal del punto nodal Badalona 1 y umbral de decisión con probabilidad de falsa alarma del 1 % 75

Figura 47. Procedimiento del procesado de los puntos nodales 80

Figura 48. Ejemplo de punto Nodal 3 una vez procesado 80

Figura 49. *Inputs* y *output* de la función ProcesarPunto.m 80

Figura 50. *Inputs* y *output* de la función Umbral_PFA.m 81

Figura 51. *Inputs* y *output* de la función TVWS.m 81

Figura 52. Procedimiento a nivel de usuario del A.I *Kriging* para la obtención de los puntos *Kriging* 82

Figura 53. Ejemplo punto *Kriging* una vez finalizado el A.I 82

Figura 54. *Inputs* y *output* de la función *Kriging*.m 83

Figura 55. Procedimiento llevado a cabo en *Kriging*.m para implementar el A.I *Kriging* 84

Figura 56. Radios del A.I *Kriging* analizados y los puntos nodales que albergan en su interior para el punto Validación 1 87

Figura 57. RMSE para los diferentes radios del *Kriging* en el punto Validación 1 88

Figura 58. RMSE para los diferentes radios del A.I *Kriging* en el punto Validación 2 88

Figura 59. RMSE para los diferentes radios del A.I *Kriging* en el punto Validación 3 89

Figura 60. RMSE para los diferentes radios del A.I *Kriging* en el punto Validación 3 excluyendo el punto con buena visibilidad 89

Figura 61. Error absoluto por canal en el punto Validación 1 90

Figura 62. Error absoluto por canal en el punto Validación 2 91

Figura 63. Error absoluto por canal en el punto Validación 3 91

Figura 64. Error absoluto para los canales susceptibles de ser TVWS en el punto Validación 1 92

Figura 65. RMSE para los A.I *Nearest* y *Kriging* y para resoluciones de 1 Km y 2 Km en el punto Validación 1 93

Figura 66. RMSE para los A.I *Nearest* y *Kriging* y para resoluciones de 1 Km y 2 Km en el punto Validación 2 94

Figura 67. RMSE para los A.I *Nearest* y *Kriging* y para resoluciones de 1 Km y 2 Km en el punto Validación 3 94

Figura 68. Espectro canal 22 punto Validación 1 97

Figura 69. Espectro canal 35 punto Validación 1 97

Figura 70. Espectro canal 36 punto Validación 1 98

Figura 71. Comparación detección TVWS real y detección TVWS de los A.I *Kriging* y *Nearest* en el punto Validación 1 99

Figura 72. Comparación detección TVWS real y detección TVWS de los A.I *Kriging* y *Nearest* en el punto Validación 2 99

Figura 73. Punto Validación 2 y puntos nodales que intervienen en la interpolación 100

Figura 74. Espectro canal 35 punto Nodal 3 100

Figura 75. Espectro canal 35 punto Nodal 6 101

Figura 76. Espectro canal 49 punto Nodal 3 102

Figura 77. Punto Validación 3 y puntos nodales 4 y 6 102

Figura 78. Comparación detección TVWS real y detección TVWS de los A.I *Kriging* y *Nearest* en el punto Validación 3 103

Figura 79. Espectro canal 28 punto Nodal 4 104

Figura 80. RMSE para los A.I IDW y *Nearest* para un radio de 0.75 Km y una resolución de 1 Km 105

Índice de tablas

Tabla 1. Múltiples de cobertura estatal con abreviación y canal de emisión en la provincia de Barcelona 36

Tabla 2. Múltiples de cobertura autonómica con abreviación y canal de emisión en la provincia de Barcelona 38

Tabla 3. Múltiples de cobertura local con abreviación y canal de emisión en la provincia de Barcelona 39

Tabla 4. Canales libres y ocupados en el espectro televisivo 40

Tabla 5. Ejemplo representación coordenadas sexagesimales y decimales en una sala del edificio D4 del Campus Nord 54

Tabla 6. Ejemplo representación coordenadas UTM en una sala del edificio D4 del Campus Nord 55

Tabla 7. Potencia (dBm) y análisis de los canales libres y ocupados en la banda TDT de cada uno de los puntos nodales 76

Tabla 8. Ejemplo de estructura de datos del REM para el punto nodal Badalona 1 78

Tabla 9. Estudio teórico de los canales libres y ocupados 95

Tabla 10. TVWS teóricos y TVWS reales de los puntos de validación medidos 96

1. Introducción

1.1 Contexto del proyecto

En los últimos años se ha generado una demanda importante de espectro radioeléctrico debido a la gran cantidad de servicios inalámbricos de banda ancha que están apareciendo. Pero el espectro es un recurso limitado y no se puede hacer frente a esta demanda ilimitadamente. Además, las redes inalámbricas actuales se caracterizan por una política de asignación del espectro estático, donde se asigna el espectro radioeléctrico a los titulares de licencias a largo plazo y para grandes regiones geográficas. En estas asignaciones de frecuencia solamente el titular de la licencia tiene derecho a hacer uso del espectro adjudicado.

Esto ha llevado a una situación de aparente escasez del espectro actual, sin embargo se han realizados diversas campañas de medidas para comprobar el grado de ocupación del espectro radioeléctrico y se ha concluido que una gran parte del mismo está infrautilizado. Efectivamente se encuentran partes del espectro que están absolutamente congestionadas y otras partes que se utilizan de forma esporádica o directamente no se utilizan, originando lo que se denomina *spectrum hole* o *white space*.

Esto ha provocado un gran número de actividades e iniciativas para mejorar la gestión del espectro y hacer frente a esta infrautilización. Estas iniciativas pasan por hacer un uso secundario del espectro cuando este no se está usando en un lugar o en un tiempo, es lo que se conoce como acceso dinámico al espectro (*Dynamic Spectrum Access*). Sin embargo este uso secundario del espectro debe respetar los usuarios legítimos, sin interferirlos y abandonando el espectro cuando uno de ellos quiera transmitir. Una de las opciones más interesantes para hacer una utilización eficiente del espectro es la *Cognitive Radio (CR)*. La CR es una tecnología que permite a los dispositivos modificar sus características de transmisión y recepción y adaptarse al entorno, pudiendo hacer un uso secundario del espectro.

La *Cognitive Radio* ha de ser capaz de detectar las partes del espectro radioeléctrico que están siendo inutilizadas y además ir actualizando esta información por si viene un usuario primario queriendo hacer uso de esa parte del espectro. Esto podría ser demasiado procesado para un dispositivo como por ejemplo un teléfono móvil y además, la medición del espectro en un solo punto podría no ser suficiente para sacar conclusiones de ocupación del espectro en un entorno determinado.

Para facilitar la función de detección del espectro e identificación de los *white spaces* de una red *Cognitive Radio* (CRN) aparece el concepto de *Radio Environment Map* (REM). Un REM es una base de datos con inteligencia que almacena información del entorno y la mantiene actualizada. Se encarga de generar un mapa de ocupación espectral procesando toda la información de que dispone permitiendo disminuir el procesado de los dispositivos que actúan en una CRN, los cuales a partir de su localización obtienen toda la información necesaria sobre los *white spaces* por medio de una consulta al REM. Un REM se puede construir mediante el conocimiento de la ubicación de los transmisores y aplicando modelos de propagación, o realizando medidas en puntos nodales estratégicos y aplicando una interpolación espacial para estimar todos los datos del entorno no conocidos y poder generar un mapa de ocupación espectral.

Se considera la parte del espectro destinada a la televisión (470-792 MHz) como una de las mejores candidatas para explotar redes *Cognitive Radio*, por sus buenas condiciones de propagación, la naturaleza estática de sus emisiones y para el aprovechamiento de las frecuencias que quedaron libres después de producirse el paso de la televisión digital a la televisión analógica. Las partes del espectro televisivo que no están siendo utilizadas se conocen como *TV White Spaces (TVWS)*. Por este motivo en este proyecto se ha planteado construir un REM de TV *White Spaces* en la zona norte del Área Metropolitana de Barcelona (AMB). Para ello se ha realizado una campaña de medidas en diversos puntos y a partir de algunas de estas medidas construir el REM mediante algoritmos de interpolación, en especial el algoritmo de interpolación *Kriging*, elegido en el presente proyecto para la construcción del REM. Las otras medidas realizadas van a permitir poder validar el REM creado a partir del algoritmo de interpolación *Kriging* y poder sacar conclusiones sobre su rendimiento.

1.2 Objetivo

El objetivo de este proyecto es la creación y la validación de un REM de *TV White Spaces* en la zona norte del AMB. Para la construcción del REM se ha de llevar a cabo una campaña de medidas de ocupación de la banda de TV en esta zona del AMB. Algunas de estas medidas han de servir como puntos nodales para la creación del REM y otras han de servir para validar los puntos estimados obtenidos mediante el algoritmo de interpolación *Kriging* implementado en el REM.

Se es consciente que el espectro televisivo puede seguir sufriendo modificaciones debido a la definitiva liberación del Dividendo Digital y a la reordenación de los canales de televisión y

algunas medidas realizadas pueden no ser útiles al cabo de unos meses. Pero por lo que respecta a este proyecto, esto es secundario ya que el principal objetivo del mismo es implementar algoritmos de interpolación para la construcción de un REM y ver el rendimiento que ofrece para en un futuro ser desarrollados.

1.3 Estructura de la memoria

El presente proyecto se estructura en 6 capítulos de la siguiente forma:

- Capítulo 1: Se presenta una introducción del proyecto, exponiendo el contexto y el objetivo del mismo y cómo se va a estructurar la memoria.

- **Capítulo 2:** Se realiza el marco referencial donde se contextualiza el proyecto y se detallan los conceptos teóricos básicos. Entre ellos el concepto de *Cognitive Radio* y un estudio de la configuración actual de la Televisión Digital Terrestre (TDT).

- Capítulo 3: Se explican los diferentes algoritmos de interpolación para la creación de un REM, entre ellos el *Kriging*, y las consideraciones previas para crearlo en un entorno como la zona norte del AMB.

- Capítulo 4: Se detallan los diferentes equipos utilizados en la campaña de medidas, su configuración, la metodología de medición realizada y el proceso de planificación de los puntos a medir en la zona norte del AMB.

- Capítulo 5: Se muestra el procesado de datos que se ha llevado a cabo para la construcción del REM a partir del algoritmo de interpolación elegido, el *Kriging*.

- Capítulo 6: Se valida el rendimiento del algoritmo de interpolación *Kriging* para la construcción del REM y se compara con otros algoritmos para extraer conclusiones.

- Capítulo 7: Se detallan las conclusiones que se han obtenido de este estudio y se comentan las posibles líneas futuras.

2. Marco referencial

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos básicos en el cual se basa el proyecto para dar una idea general del marco referencial en el que se encuentra. En primer lugar se explica detalladamente qué es la *Cognitive Radio*. A continuación, se detalla la gran evolución que se ha vivido en la televisión y los cambios en el espectro televisivo, y por último se introduce el concepto de los *TV White Spaces*.

2.1 *Cognitive Radio*

A continuación se introduce el concepto de *Cognitive Radio (*Radio Cognitiva*)*, explicando sus características y toda la arquitectura de red para llevar a cabo su función.

2.1.1 Introducción a la *Cognitive Radio*

Actualmente existe una escasez en el espectro para la importante demanda de servicios inalámbricos que surgen. Además, campañas de medidas realizadas en los últimos años han permitido observar que hay una gran infrautilización del espectro actual ya asignado a los titulares de la licencia. Esto ha provocado un importante número de actividades e iniciativas para la búsqueda de mejoras en la gestión del espectro. Como por ejemplo lograr una gestión dinámica del espectro para que una banda de frecuencias pueda ser utilizada por diferentes usuarios en distintos instantes de tiempo y para diferentes tecnologías, gracias a las capacidades de reconfiguración de terminales y redes. Es aquí donde aparece el concepto de *Cognitive Radio* (CR) para conciliar el crecimiento de la demanda de espectro actual y su infrautilización sin cambios en la distribución de las bandas de frecuencia existentes. La CR permite una mayor eficiencia del espectro junto con el acceso dinámico. La idea básica es permitir a usuarios sin licencia acceder y hacer un uso temporal de las bandas no ocupadas por los usuarios con licencia de manera que no los interfiera. Permitiendo realizar un uso secundario del espectro a partir de un acceso dinámico al mismo. Todo esto hace a la CR una tecnología atractiva para el futuro inalámbrico [1].

En la Figura 1 [2] se puede ver a modo de viñeta la situación de congestión que viven las bandas destinadas a las comunicaciones vía móvil y la mejora que ofrece el uso de las CR utilizando otras bandas de frecuencia destinadas a diferentes propósitos.

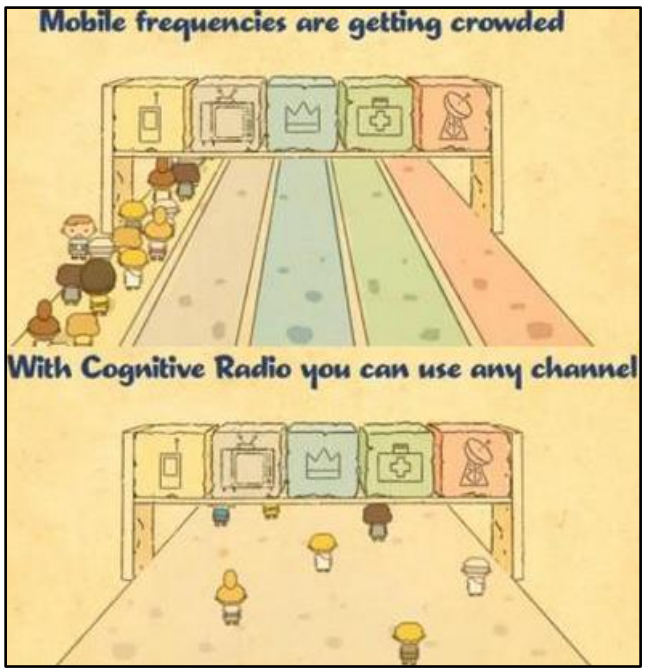


Figura 1. Situación actual de congestión y las ventajas de utilizar la *Cognitive Radio*

2.1.2 Características: Capacidad Cognitiva y Reconfiguración

Una radio cognitiva es una radio inteligente que se puede programar y configurar de forma dinámica. Una vez detecta los canales disponibles en el espectro inalámbrico, cambia sus parámetros de transmisión o recepción para permitir las comunicaciones inalámbricas en esa parte del espectro. Sus dos características principales son las siguientes: Capacidad Cognitiva y Reconfiguración [3].

- Capacidad Cognitiva:

Las CR pueden identificar las porciones del espectro que no están siendo identificadas en un determinado instante mediante la interacción en tiempo real del entorno. Permite el uso de la parte del espectro temporalmente inutilizada y utilizarla sin interferencia a los usuarios legítimos. Esta parte del espectro no utilizada recibe el nombre de *spectrum hole* o *white space* (Figura 2).

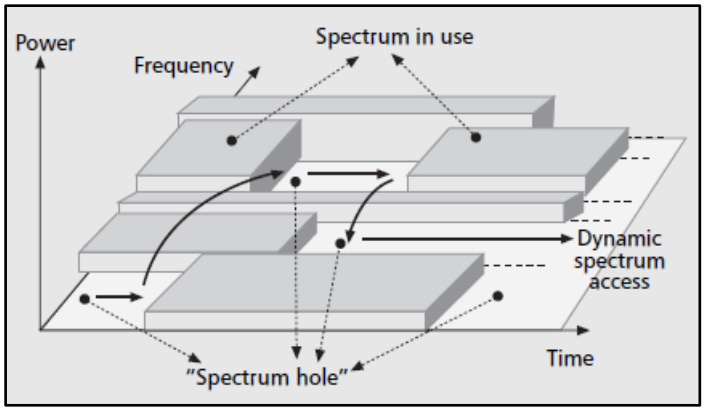


Figura 2. Concepto de *spectrum hole*

- Reconfiguración:

Las CR son programadas para transmitir y recibir en un amplio rango de frecuencias y gestionar diferentes tecnologías de acceso gracias a su diseño *hardware* (Figura 3). Esto permite que una vez elegida la mejor banda de frecuencias a operar, los parámetros de configuración puedan ser seleccionados y reconfigurados.

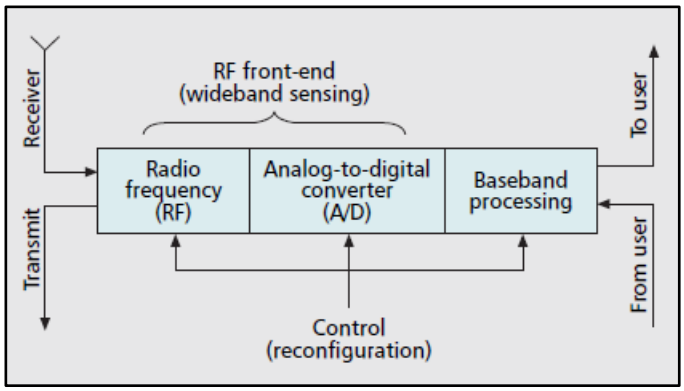


Figura 3. Diseño del transceptor de las *cognitive radio*

2.1.3 Arquitectura de red de las *Cognitive Radio*

En este apartado se introducen las redes de Radio Cognitiva, en inglés CR *networks* (CRN), y cómo se forma su arquitectura. De las CRN, se presentan sus componentes, los requisitos que han de cumplir para poder operar, en qué bandas operan, cómo acceden a la red y por último cómo gestionan el espectro de su entorno para tener una capacidad cognitiva [3][4].

2.1.3.1 Componentes de la red

Los componentes de la arquitectura de las CRN se pueden clasificar en dos grupos: la red primaria y la red *Cognitive Radio*.

- Red primaria:

La red primaria es la red que ya se encuentra operando en una determinada banda del espectro, donde los usuarios tienen licencia para operar. En el caso de que tengan infraestructura, las actividades están controladas por la estación base primaria. Los usuarios que tienen licencia para operar en esta red tienen prioridad y por lo tanto el rendimiento de éstos nunca puede verse afectado por los usuarios sin licencia (Figura 4).

- Red *Cognitive Radio*:

La red *Cognitive Radio* es la red secundaria que no tiene licencia para operar en una banda determinada. Por este motivo, los usuarios CR tienen que compartir la banda del espectro asignada a los usuarios primarios, siempre y cuando no los interfiera. Las CRN también pueden tener sus propias estaciones base para que los usuarios CR puedan comunicarse entre ellos (Figura 4).

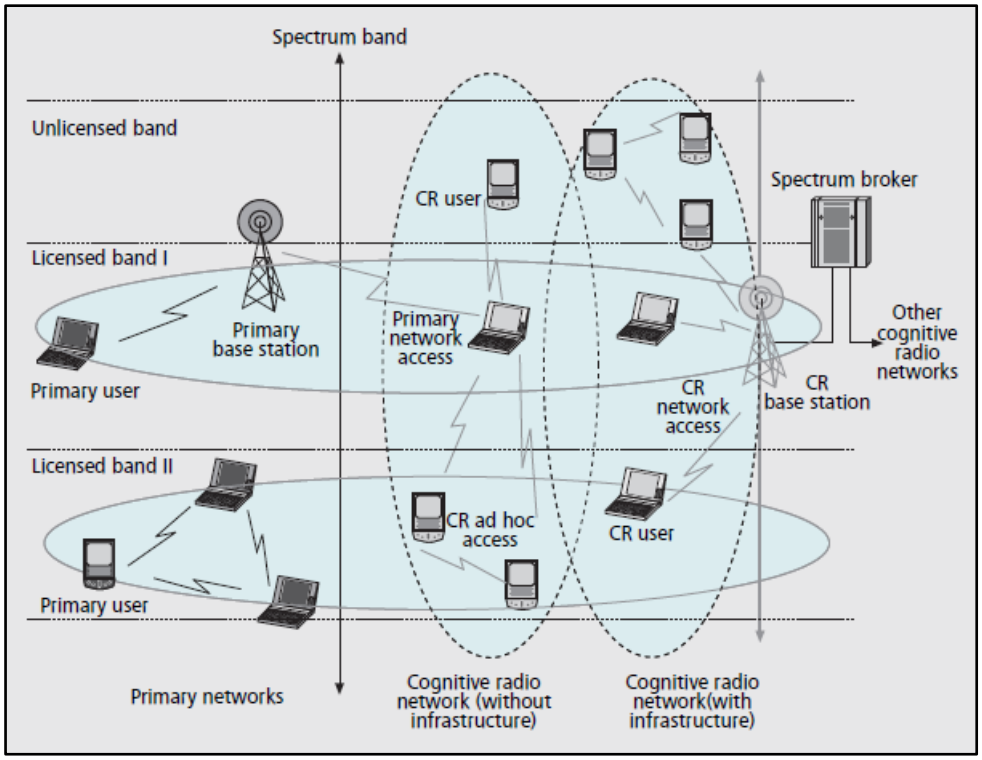


Figura 4. Arquitectura de la red de *Cognitive Radio*

2.1.3.2 Requisitos de las *Cognitive Radio*

Para poder llevar a cabo una CRN en un entorno real se deben cumplir una serie de requisitos fundamentales en la gestión del espectro: evitar interferencias, garantizar QoS (*Quality of Service*) y comunicación sin interrupciones.

- **Evitar interferencias:** las CRN no deben interferir en ningún momento a los usuarios primarios.
- **Garantizar QoS:** se debe garantizar un QoS determinado a los usuarios CR. Es decir, las CR han de ser capaces de buscar bandas del espectro disponibles para brindar este nivel de QoS.
- **Comunicación sin interrupciones:** las CRN deben proporcionar una comunicación fluida y con un QoS garantizado aunque aparezcan usuarios primarios con legitimidad sobre el espectro.

2.1.3.4 Bandas de operación y tipos de acceso a la red

Las CRN pueden operar tanto en las bandas del espectro con licencia asignada, utilizada por los usuarios primarios, como en las bandas sin licencia (Figura 4).

- Banda del espectro con licencia:

Se utiliza principalmente por la red primaria. Las CRN se centran principalmente en la detección de usuarios primarios en este tipo de bandas. La capacidad de la banda por parte de los usuarios CR depende de los usuarios primarios que puedan aparecer.

- Banda del espectro sin licencia:

Debido a la inexistencia de usuarios primarios, los usuarios CR tienen el mismo derecho de acceso al medio. Por lo tanto, se deben utilizar métodos de compartición del espectro de la banda sin licencia para los usuarios CR.

Los usuarios CR pueden acceder al medio y comunicarse a través de tres tipos de acceso: acceso red *Cognitive Radio*, acceso *ad hoc* y acceso red primaria (Figura 4).

- Acceso red *Cognitive Radio*:

Los usuarios CR pueden acceder a su propia estación base CR, tanto en las bandas del espectro con licencia como en las sin licencia. Debido a que todo ocurre dentro de la CRN, puede ser independiente de la de la red primaria.

- Acceso *ad hoc:*

Los usuarios CR pueden comunicarse con otros usuarios CR a través de una conexión *ad hoc* entre ambos sin necesidad de una estación base. Esto se puede realizar tanto en las bandas del espectro con licencia como en las sin licencia.

- Acceso red primaria:

Los usuarios CR también pueden acceder a la estación base primaria a través de las bandas del espectro con licencia. En este caso, los usuarios CR requieren un protocolo de control de

acceso MAC para permitir la comunicación a través de diversas redes primarias con diferentes tecnologías de acceso.

2.1.3.5 Proceso gestión del espectro

Para llevar a cabo todo lo comentado anteriormente se debe realizar un proceso para la gestión del espectro, también llamado ciclo cognitivo, para que las CRN puedan operar correctamente. Consta de cuatro pasos: detección, decisión, reparto y movilidad (Figura 5) [5].

- **Detección del espectro (Spectrum Sensing):** detección del espectro para encontrar porciones inutilizadas para ser aprovechadas por los usuarios CR.

- **Decisión del espectro (Spectrum Decision):** decisión de la parte del espectro más adecuada para que los usuarios CR puedan hacer uso de esta inutilización.

- **Reparto del espectro (Spectrum Sharing):** reparto del espectro debido a que hay gran cantidad de usuarios CR intentando acceder a estos *white spaces* y se tiene que coordinar.

- **Movilidad del espectro (Spectrum Mobility):** movilidad del espectro en el caso que aparezca un usuario primario con licencia que quiera hacer uso de esa parte del espectro.

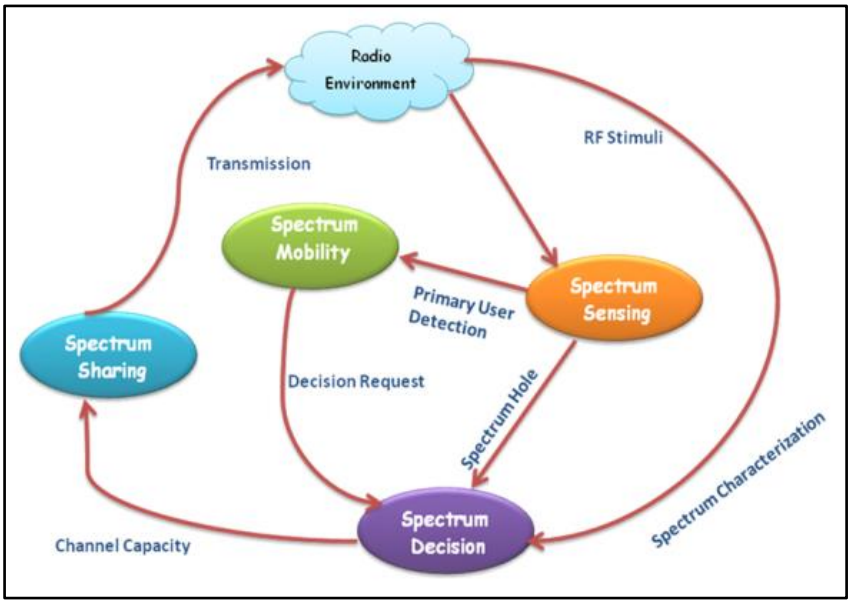


Figura 5. Ciclo cognitivo

2.1.3.6 Detección del espectro

Para llevar a cabo la detección del espectro se tiene que hacer un estudio del entorno para saber con certeza si los usuarios primarios están haciendo uso del espectro para no interferirles y encontrar posibles *white spaces*. Existen tres tipos de técnicas para la detección de la utilización del espectro: detección del transmisor primario, detección del receptor primario y la gestión de la temperatura de interferencia.

- **Detección transmisor primario:** se basa en la detección de señales débiles de los transmisores primarios por parte de los usuarios CR. Uno de los problemas que pueden aparecer con esta técnica de detección es que no se detecten los receptores primarios, ya que sólo se basa en la información de los transmisores. Se podría provocar interferencias sobre los receptores primarios ya que se considera que el canal esta libre al no detectar ningún transmisor primario (Figura 6). El otro problema es que los usuarios CR no pueden detectar el transmisor primario debido al terminal oculto (Figura 7). Estos problemas se podrían mejorar realizando una detección cooperativa entre más de un usuario CR y compartiendo la información entre ellos [3].

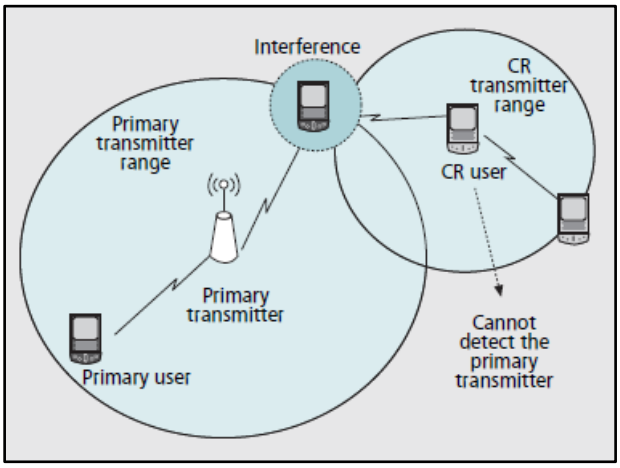


Figura 6. Problema interferencia al receptor primario

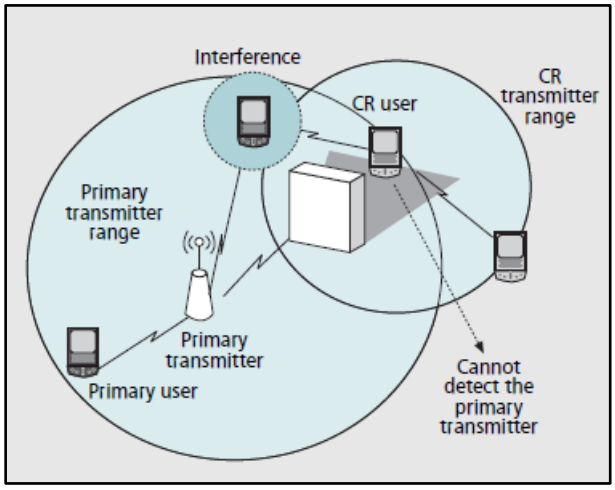


Figura 7. Problema terminal oculto

Hay tres tipos de formas de realizar la detección del transmisor primario: detección filtro adaptado, detección de periodicidad y detección de energía.

En el caso de que se tenga información de la señal el mejor método es la detección filtro adaptado. Si las señales a detectar son periódicas, se utilizaría la detección de periodicidad. Cuando no se dispone de mucha información a priori de las señales a detectar, la mejor es la detección de energía ya que compara la señal recibida con el nivel de ruido. En el presente proyecto se utiliza la detección de energía debido a que las características del proyecto y las señales a detectar la hacen la más adecuada.

- Detección receptor primario: se basa en la detección de los usuarios primarios que están recibiendo señales y que se encuentran en un radio dentro del rango de los usuarios CR. Es la técnica más eficiente para la detección de *white spaces,* pero a la vez la más laboriosa.

- Gestión interferencia de temperatura: esta técnica se basa en limitar la interferencia en el receptor a una interferencia límite. Los usuarios CR podrán hacer uso de la banda espectral utilizada por los usuarios primarios siempre y cuando no sobrepasen esta interferencia límite.

2.1.4 *Radio Environment Map* en redes de *Cognitive Radio*

Se ha podido observar todo lo que ofrece la tecnología CR, pero esto comporta un procesado muy elevado. Además, el dispositivo que actúe en una CRN ha de ser capaz de realizar todas estas operaciones en una gran parte del espectro para realizar todo el ciclo cognitivo. Esto sería demasiado para un dispositivo como por ejemplo podría ser un teléfono móvil.

Una posible solución es la utilización de una base de datos de geolocalización donde se almacena la información del espectro radioeléctrico como por ejemplo los transmisores primarios existentes en un entorno determinado. Los usuarios a partir de su localización, consultan la base de datos donde se encuentra la información necesaria para poder determinar los posible *white spaces* antes de acceder al espectro.

Las bases de datos de geolocalización fueron un paso adelante a la hora de facilitar la función cognitiva de los dispositivos, pero estos dispositivos todavía tenían un alto grado de procesado ya que las bases de datos de geolocalización almacenan información casi-estática del entorno. Esto provoca que tenga dificultades para adaptarse a entornos reales donde el espectro es dinámico y en que los usuarios primarios pueden cambiar frecuentemente sus actividades. Es aquí donde aparece el término de *Radio Environment Map* (REM) para lidiar con esta cuestión.

A diferencia de las bases de datos de geolocalización, un REM es una base de datos inteligente que almacena información en tiempo real y además un histórico de los datos de su entorno. Se encarga de generar un mapa de ocupación espectral procesando toda la información de que dispone. Esto permite facilitar la función de detección del espectro de una red *Cognitive Radio* (CRN) y liberar a los dispositivos de todo el procesado. Simplemente consultando el REM los dispositivos son capaces de conocer los posibles *white spaces* que hay en el punto donde se encuentran. La utilización de un REM nos permite que un simple dispositivo sin funcionalidades cognitivas pueda realizar la función de una CR consultando una base de datos con toda la información necesaria [6][7].

Un REM se puede construir de dos formas distintas, o bien conociendo la ubicación de los transmisores y aplicar modelos de propagación para poder generar un mapa de ocupación espectral, o realizando medidas en puntos nodales estratégicos y aplicar una interpolación espacial para estimar todos los datos del entorno no conocidos. En los siguientes capítulos se explican más detalladamente estas dos técnicas, en especial el método basado en la interpolación espacial por medio de algoritmos de interpolación.

2.2 Televisión Digital terrestre (TDT)

A continuación se detalla la Televisión Digital Terrestre (TDT), empezando con una introducción para contextualizar la llegada de la TDT y siguiendo con sus características y los beneficios que aporta respecto a la televisión analógica. Además, se explica el concepto del Dividendo Digital que surge gracias a la introducción de la televisión digital y que en estos últimos meses ha aparecido en multitud de ocasiones en los medios de comunicación. Por último, se detalla la distribución de los canales de televisión actuales.

2.2.1 Introducción a la TDT

La Televisión Digital Terrestre es el resultado de la evolución de la televisión analógica y de la aplicación de la tecnología digital a la señal de televisión. Antiguamente la televisión analógica utilizaba para su emisión la parte de la banda de frecuencias de VHF 47-230 MHz y la parte de la banda de UHF 470-862 MHz. Debido a la aparición de tecnologías digitales y nuevos procesos de compresión y detección de errores se produjo la llegada de la TDT. En 2005 se realizaron las primeras emisiones de TDT y en abril de 2010 finalizó la emisión de televisión analógica con el denominado apagón analógico. La introducción de la TDT permitió reducir el número de frecuencias necesarias para la transmisión de la televisión pasando sólo a utilizar parte de la banda UHF 470-862 MHz. Debido a una gestión más eficiente del espectro se permitió obtener un dividendo en forma de nuevas frecuencias disponibles, conocido como Dividendo Digital (792-862 MHz). Pero la TDT siguió haciendo usos de este dividendo para facilitar la transición de la televisión analógica a digital y no fue hasta octubre de 2014 cuando la TDT sufrió una reordenación y paso a emitir solamente en la parte del espectro 470-790 MHz para dejar paso a la liberación del Dividendo Digital. Inicialmente se debía liberar el 1 de enero de 2015, pero finalmente se aplazó hasta el 31 de marzo de 2015 [8][9].

2.2.2 Características y beneficios de la TDT

Actualmente la TDT utiliza la parte del espectro radioeléctrico 470-792 MHz. Utiliza el estándar de Televisión Digital Terrestre Digital DVB-T (*Digital Terrestrial Video Broadcasting-Terrestrial*) y una canalización de 8 MHz. Es decir, existen 40 canales de 8 MHz donde el primero se denomina canal 21 y utiliza la parte del espectro 470-478 MHz, y el último se denomina canal

60 y utiliza 782-790 MHz (Figura 8) [10]. En este caso el canal es la porción del espectro radioeléctrico que se utiliza para la difusión de una señal de televisión. No se debe confundir el concepto de canal radioeléctrico con los canales de televisión que se detallan en el apartado 2.2.4. En cada uno de los canales se emite un Múltiple, el cual es la señal compuesta para transmitir en un canal y que al utilizar tecnología digital, permite la incorporación de las señales correspondientes a varios canales de televisión [11].

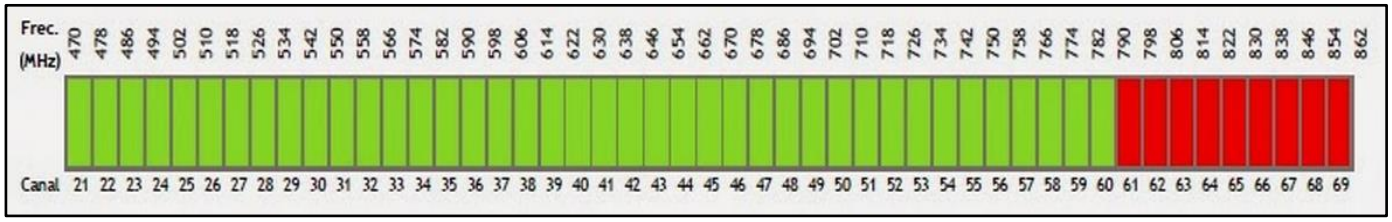


Figura 8. Parte del espectro dedicado a la TDT (en verde) y parte del espectro dedicada al Dividendo Digital (en rojo) con sus respectivos canales.

Como se ha dicho anteriormente, el estándar utilizado en España es el DVB-T. Existen cuatro estándares de televisión y se usa uno u otro dependiendo del que haya elegido cada país (Figura 9). Los estándares son los siguientes: DVB-T, ATSC (*Advanced Television Systems Comitee*), ISDB-T (*Integrate Services Digital Broadcasting*) y DTMB (*Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*). En España y como en toda la zona Euro se decidió utilizar el DVB-T [12].

El estándar DVB-T usado en España utiliza la modulación COFDM, la cual ofrece una señal robusta y proporciona protección contra los ecos producidos por la propagación de la señal por los múltiples caminos. Además, el estándar COFDM permite diferentes codificaciones como el modo 2K, pensado para transmisiones con potencias reducidas que cubran áreas geográficas reducidas, o el modo 8K que puede utilizarse por áreas geográficas extensas en un único canal, común en toda la red. Por último, como se ha dicho anteriormente, utiliza una canalización de 8 MHz para un uso óptimo del espectro [13][14].

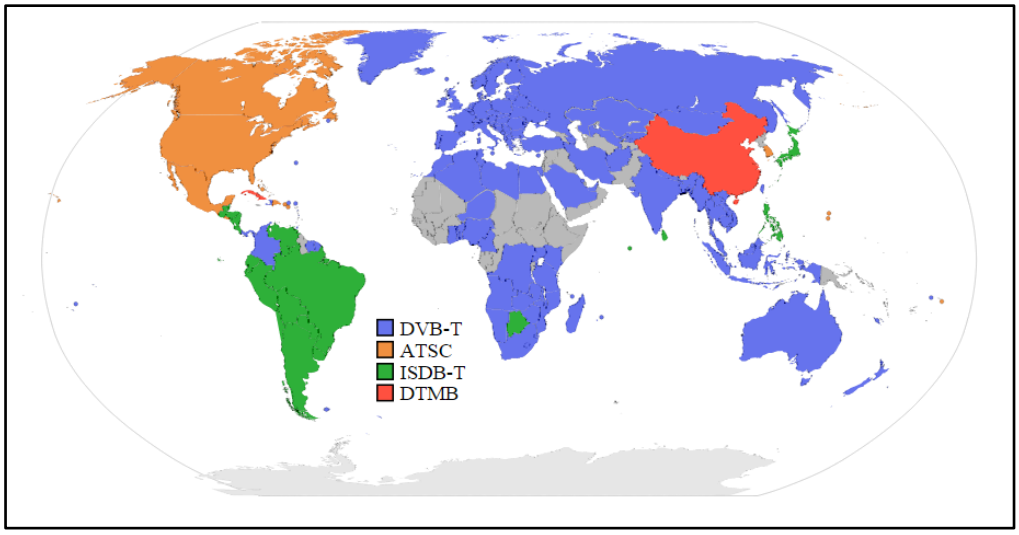


Figura 9. Mapa de los estándares de televisión utilizados en los diferentes países

La llegada de la tecnología digital ayudada por diferentes métodos de compresión como mpeg-4 permiten un uso mucho más eficiente del espacio radioeléctrico transmitiendo por un múltiplex hasta 7 canales de televisión en SD (*Standard Definiton*) o 4 en HD (*High Definiton*) en el espacio ocupado donde anteriormente con la televisión analógica sólo se podía transmitir un único canal de televisión.

La TDT permite una mejora en la calidad de la recepción y amplía la oferta disponible tanto en número de canales como en versatilidad del sistema. Como se ha dicho anteriormente permite la emisión en HD respecto a la emisión SD en que se emitía con la televisión analógica. Además, permite la emisión en formato panorámico 16:9 a diferencia del usado anteriormente, el 4:3 [15].

2.2.3 Dividendo Digital

Por Dividendo Digital se entiende las nuevas frecuencias (790-862 MHz) obtenidas por la evolución de la televisión analógica a la televisión digital y destinadas a servicios de comunicaciones electrónicas debido a la importancia que tienen hoy en día. El tráfico de datos móviles está experimentando un incremento exponencial en Europa, lo que implica una mayor necesidad de frecuencias libres para poder prestar el servicio con una calidad adecuada y poder satisfacer la demanda existente. Además, la liberación del dividendo digital para prestar servicios de banda ancha es buena para el desarrollo económico, ya que se asocia la expansión de la banda ancha con crecimiento económico, mejoras de la productividad e impulso del

empleo [8]. Este dividendo se asignará a los operadores de telefonía móvil para prestar nuevos servicios de banda ancha de cuarta generación (4G).

2.2.3.1 Antecedentes del Dividendo Digital

En el ámbito internacional, la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2006 acordó el uso de toda la banda 470-862 MHz para los servicios de radiodifusión. Sin embargo, con posterioridad, la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2007 aprobó la atribución al servicio de comunicaciones móviles en uso co-primario con los servicios de radiodifusión de la banda de frecuencias 790-862 MHz.

Al amparo de estas decisiones regulatorias internacionales, la Comisión Europea publicó en 2010 una Decisión (2010/267/UE) para armonizar las condiciones técnicas relativas a la disponibilidad y utilización eficiente de esta banda para prestar servicios de comunicaciones electrónicas en la Unión Europea, dando lugar al Dividendo Digital. El objetivo era garantizar el uso de la banda del dividendo digital para servicios de banda ancha de 4G, considerados clave para la recuperación económica. Por otra parte, el acceso al dividendo digital es considerado fundamental para la consecución de los objetivos de cobertura de banda ancha establecidos en la Agenda Digital para Europa.

En el ámbito nacional, la parte de frecuencia destinada al Dividendo Digital se había utilizado previamente para la coexistencia entre la televisión analógica y televisión digital. Una vez se llevó a cabo el apagón analógico el 3 de abril de 2010, mediante el Real Decreto 365/2010 y siguiendo las instrucciones dadas por la Comisión Europea, se reguló un proceso de reordenación del espectro para que la banda de frecuencias de 790 a 862 MHz (canales del 61 a 69) pudiera quedar reservada para nuevos servicios de banda ancha antes del 1 de enero de 2015.

En la Figura 10 se puede apreciar la evolución de las atribuciones de la parte del espectro destinado a la televisión.

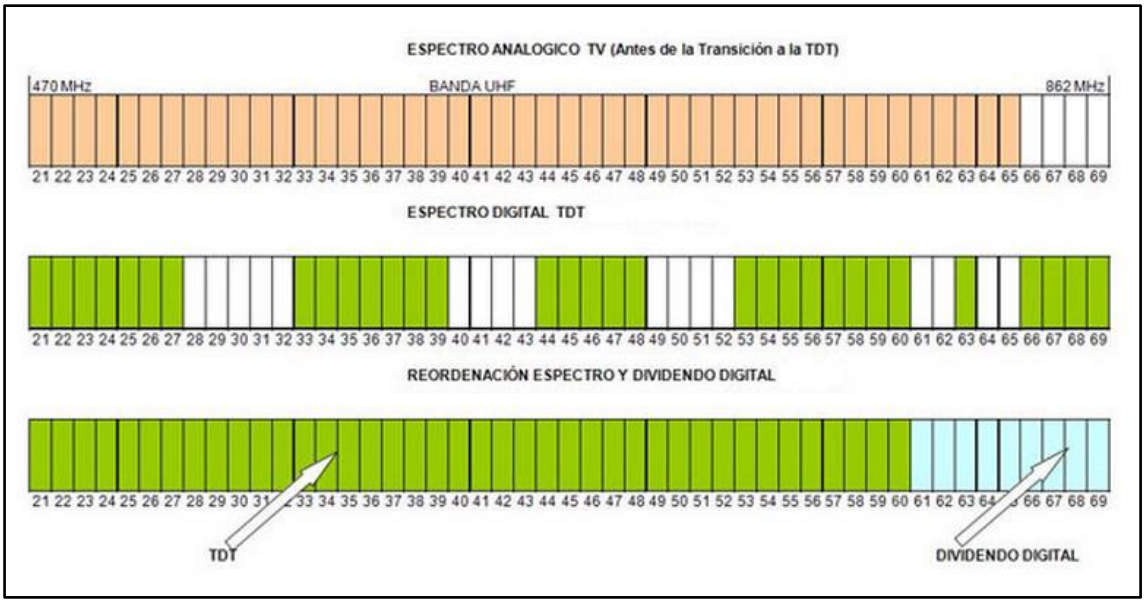


Figura 10. Evolución de las atribuciones de la parte del espectro destinada a la televisión

2.2.3.2 Situación actual Dividendo Digital

La reordenación del espectro para liberar el Dividendo Digital se realizó el día 26 de octubre de 2014. Para que la reordenación de los canales no fuera tan dramática para los ciudadanos y tuvieran tiempo suficiente para resintonizar los receptores y adaptar las antenas, se intentó realizar con el mínimo impacto a los ciudadanos. Algunos canales de televisión se emitirían durante unos meses en *simulcast,* de forma simultánea en la antigua y la nueva frecuencia, en los principales centros emisores para de esta forma asegurar que todos los ciudadanos pudieran seguir recibiendo toda la oferta televisiva [16].

El proceso debía haber finalizado el 1 de enero de 2015, fecha en la que todos los canales de televisión tendrían que estar emitiendo en una única frecuencia y liberar definitivamente el Dividendo Digital. Pero ante la imposibilidad de adaptar todas las antenas en esta fecha y las presiones por parte del sector de la TDT, el 26 de diciembre de 2014 se aprobó un real decreto ley en el que se amplía hasta el 31 de marzo de 2015 el plazo máximo para liberar el Dividendo Digital [17].

2.2.4 Canales de TDT en la provincia de Barcelona

Como se ha dicho anteriormente, la TDT utiliza la parte del espectro radioeléctrico 470-792 MHz, dividido en canales radioeléctricos que van del 21 al 60. En cada uno de los canales se

emite un Múltiple, el cual es la señal compuesta para transmitir en un canal y que incorpora las señales correspondientes a varios canales de televisión. En España, los múltiples se dividen en función de la cobertura y su ámbito de la siguiente forma: múltiples estatales, múltiples autonómicos y múltiple locales [18].

El canal por el que emite un múltiple varía en función de la situación geográfica. Como que el proyecto se centra en el estudio de la zona norte del Área Metropolitana de Barcelona, se decidió detallar únicamente los canales por los que se emiten los múltiples en la provincia de Barcelona.

2.2.4.1 Múltiples de cobertura estatal

El servicio de TDT de cobertura estatal se presta a través de la capacidad de siete múltiples digitales que se corresponden con cinco múltiples digitales basados en los múltiples RGE1, RGE2, MPE1, MPE2 y MPE3 que ya se venían explotando antes de la liberación del Dividendo Digital, y con dos nuevos múltiples digitales, MPE4 y MPE5 (Tabla 1) [19].

Múltiples estatales	Abreviación	Canal (Barcelona)
Red Global de Cobertura Estatal 1	**RGE1**	31
Red Global de Cobertura Estatal 2	**RGE2**	41
Múltiple Privado de Cobertura Estatal 1	**MPE1**	47
Múltiple Privado de Cobertura Estatal 2	**MPE2**	27
Múltiple Privado de Cobertura Estatal 3	**MPE3**	34
Múltiple Privado de Cobertura Estatal 4	**MPE4**	29
Múltiple Privado de Cobertura Estatal 5	**MPE5**	23

Tabla 1. Múltiples de cobertura estatal con abreviación y canal de emisión en la provincia de Barcelona

Las sociedades titulares de licencias para explotar canales de televisión de cobertura estatal son ATRESMEDIA TELEVISION, MEDIASET ESPAÑA, VEO TV, NET TV y RTVE y se distribuyen dentro de los múltiples estatales de la siguiente forma (Figura 11) [16]. Las partes del múltiple que aparecen como concurso, serán adjudicadas mediante el procedimiento de concurso [11].

ATRESMEDIA TELEVISIÓN: **MEDIASET ESPAÑA:**

VEO TV: **NET TV:** **RTVE:**

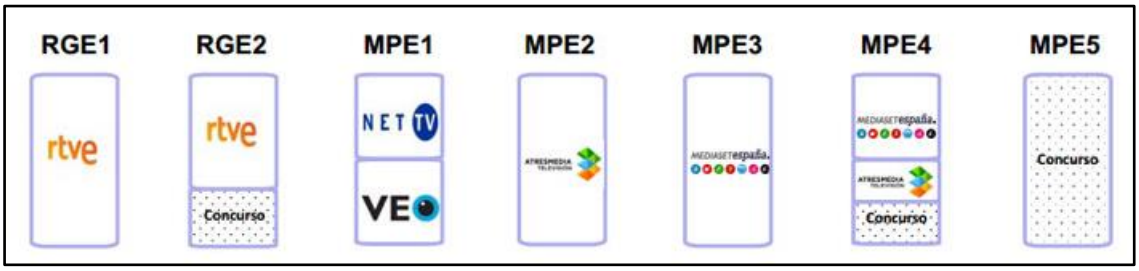


Figura 11. Distribución de los operadores en los diferentes múltiples

Anteriormente, antes de la libración del Dividendo Digital, los canales de televisión se distribuían de forma distinta (Figura 12). Como se puede ver en la imagen, después de la ordenación, se ha intentado unificar lo más posible cada múltiple a una sociedad prestadora de servicios televisivos.

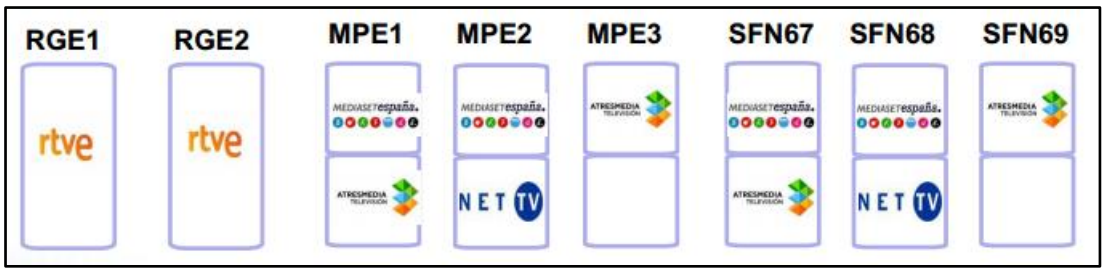


Figura 12. Distribución de los operadores en los diferentes múltiples anterior a la liberación del Dividendo Digital

Según el Ministro de Industria, Energía y Turismo [11], cada múltiple digital, cualquiera que sea su ámbito de cobertura, tiene capacidad para integrar cuatro canales de televisión en definición estándar o tres canales de televisión en alta definición. Pero la capacidad restante del múltiple, como medida de impulso de la innovación tecnológica en los servicios audiovisuales televisivos e implantación de la televisión de alta definición, se podrá utilizar para efectuar emisiones íntegras y simultáneas de canales en HD y SD. Como por ejemplo ATRESMEDIA y SOGECABLE que en los múltiple MPE2 y MP3 respectivamente emiten 4 canales, 2 de ellos en HD y SD simultáneamente para un total de 6 canales en un único múltiple (Figura 13) [20].

Las entidades que accedan a la explotación de canales de televisión dentro de un mismo múltiple compartido, deben asociarse entre sí para la mejor gestión de todo lo que afecte al múltiple digital en su conjunto o establecer las reglas para esa finalidad.

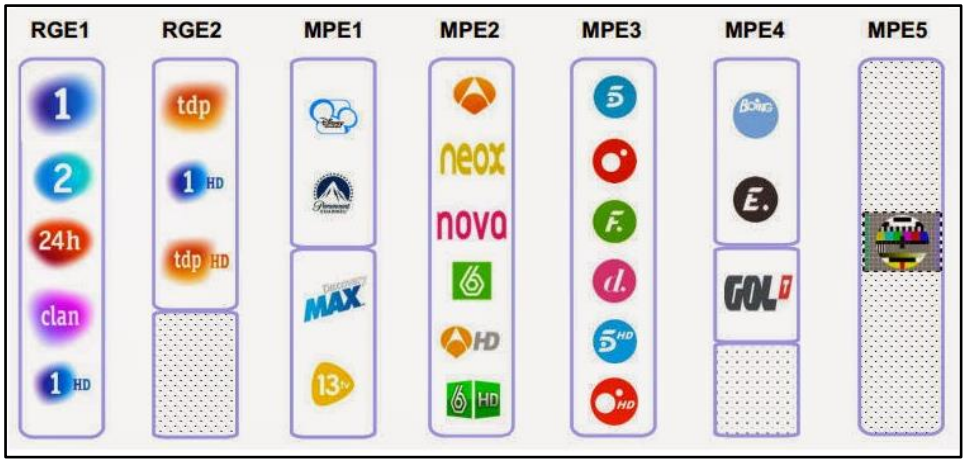


Figura 13. Canales de televisión que se emiten en cada múltiple estatal

2.2.4.2 Múltiples de cobertura autonómica

El servicio de TDT de cobertura autonómico se presta a través de la capacidad de dos múltiples digitales, MAUT y MAUTP (Tabla 2). El MAUT es el múltiple de la Corporació Catalana de Mitjans Audiovisuals (CCMA) y el MULTP es el múltiple privado con licencia para el Grupo Godó [21].

Múltiples autonómico	Abreviación	Canal (Barcelona)
Múltiple Autonómico	**MAUT**	44
Múltiple Autonómico Adicional Privado	**MAUTP**	33

Tabla 2. Múltiples de cobertura autonómica con abreviación y canal de emisión en la provincia de Barcelona

En las Figura 14 y Figura 15 se pueden apreciar respectivamente los canales de televisión que se emiten desde el múltiple destinado a la televisión pública catalana (MAUT) y el múltiple privado del Grupo Godó (MAUTP). Cabe destacar que TV3HD aparece emitiéndose dentro del múltiple MAUTP debido al alquiler de un canal al Grupo Godó. Esto se realizó porque se considera la alta definición (HD) como de interés público y porque por el MAUT no había suficiente capacidad para emitir simultáneamente el canal TV3 en alta definición [22].

Figura 14. Canales de televisión que se emiten por el múltiple MAUT

Figura 15. Canales de televisión que se emiten por el múltiple MAUTP

2.2.4.3 Múltiples de cobertura local

El servicio de TDT de cobertura local se presta a través de la capacidad de doce múltiples digitales que van del TL01B hasta el TL12B (Tabla 3). Estos son los múltiples locales que se emiten dentro de la provincia de Barcelona [23].

Múltiples locales	Abreviación	Canal (Barcelona)
Barcelona (1)	**TL01B**	26
Granollers	**TL02B**	40
Cornellà de Llobregat (1)	**TL03B**	53
Igualada	**TL04B**	37
Manresa	**TL05B**	49
Mataró	**TL06B**	24
Sabadell (1)	**TL07B**	39
Vic	**TL08B**	50
Vilanova Geltrú	**TL09B**	30
Barcelona (2)	**TL10B**	48
Cornellà de Llobregat (2)*	**TL11B**	46
Sabadell (2)	**TL12B**	45

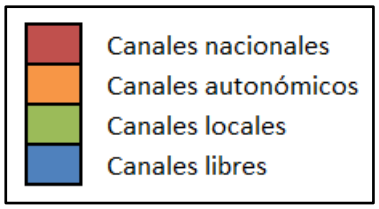
Tabla 3. Múltiples de cobertura local con abreviación y canal de emisión en la provincia de Barcelona

* En el múltiple local de Cornellà de Llobregat (TL11B) actualmente no se emite ningún canal de televisión [23].

En la Tabla 4 se muestran la totalidad de los canales que forman parte del espectro televisivo. Dentro de los cuales se encuentran los canales en los que se está emitiendo un Múltiple y los canales que se encuentran libres. Los canales que se encuentran ocupados se dividen, como se ha comentado anteriormente, dependiendo de la cobertura y su ámbito en canales estatales, locales y autonómicos. De los 40 canales que existen, solamente 21 se encuentran ocupados por emisiones de señales TDT. Estos 19 canales en los que no se está emitiendo corresponderían a 152 MHz libres, de los cuales 56 MHz se encuentran libre de manera consecutiva del canal 54 al canal 60. A todo este espectro libre se le podría añadir esos canales dedicados a la televisión local y que solamente cubren una pequeña área de la provincia de Barcelona permitiendo que en la mayoría del territorio aparezcan como canales libres (en capítulos posteriores se observan más detalladamente estos casos). Por lo tanto, todo este espectro inutilizado abre las puertas a la explotación de redes *Cognitive Radio* para conseguir un uso más eficiente del espectro televisivo.

Canales	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60

Tabla 4. Canales libres y ocupados en el espectro televisivo



2.3 TV *White Spaces*

Los *TV White Spaces* (TVWS) aparecen a raíz de aplicar el concepto de *white spaces* en el espectro destinado a la televisión. La banda 470-790 MHz está considerada como la más interesante para aplicar la tecnología *Cognitive Radio* y ha sido la primera en la cual se han puesto en práctica las aplicaciones de las redes *Cognitive Radio* [6]. Existen muchas razones por las que la hacen atractiva para la búsqueda de *white spaces*. A continuación, se detallan las oportunidades que brinda esta banda espectral y los posibles usos de los TVWS.

2.3.1 Oportunidades de la banda espectral de TV

Al producirse el paso de la televisión analógica a la televisión digital, se permitió reducir el número de frecuencias utilizadas y un uso más eficiente del espectro. Esto permite que haya canales libres en los que no se está emitiendo ningún canal de televisión y puedan ser aprovechados para otros usos siempre y cuando no interfieran a los usuarios primarios, en este caso las emisiones de señales de televisión.

Otra de las ventajas de usar la banda espectral 470-790 MHz es que tienen buenas condiciones de propagación en comparación con otras bandas de telefonía móvil como GSM (900 y 1800 MHz), 3G (900 y 2100 MHz) y 4G/LTE (800, 1800 MHz y 2600Mhz). Además, al utilizar frecuencias más bajas, la longitud de onda es mayor y permite una mayor penetración.

Por último, uno de los factores más importantes para esta elección es la naturaleza estática de las emisiones en la banda del espectro televisivo. Los transmisores primarios son estáticos y esto los hace mucho más fácil de detectar. Esto permite que el REM sufra pocas variaciones y no esté sujeta a modificaciones tan fácilmente como en el caso de otras bandas más dinámicas como la telefonía móvil en que en cualquier momento puede aparecer un usuario primario queriendo hacer uso del espectro detectado como *white space* [24][25].

2.3.2 Aplicaciones de los TV *White Spaces*

La presencia de los TVWS es de gran importancia a la hora de lidiar con la escasez del espectro radioeléctrico y de proporcionar Internet a alta velocidad u otros servicios a sus ciudadanos. Los TVWS presentan oportunidades de negocio sin precedentes. Debido a la importancia de que estos *white spaces* sean explotados de manera correcta se pusieron en marcha en Europa diferentes iniciativas, entre ellas el proyecto COGEU (*COgnitive radio systems for efficient sharing of TV white space*) para lidiar con este asunto y proporcionar un sistema eficiente para la utilización de los TVWS [7].

Una de las aplicaciones más estudiada y analizada a la hora de explotar los TVWS es para el despliegue de redes 4G LTE (*Long Term Evolution*). Esto permitiría a los operadores LTE incrementar la capacidad y aumentar la cobertura en zonas urbanas y proporcionar servicios de banda ancha a zona rurales, en donde hay mucho más TVWS, mediante redes LTE [26].

3. Algoritmos de Interpolación para la creación de un REM

En este capítulo se detallan las diferentes técnicas para la creación de un REM. Una vez elegida la técnica utilizada para la creación del REM de este proyecto, se procede a explicar los algoritmos de interpolación analizados para llevarla a cabo. Por último se explica el concepto de interpolación geográfica, el cual es importante para realizar una interpolación en áreas extensas debido al radio de curvatura de la Tierra.

3.1 Técnicas para la creación de un REM

Tal y como se ha comentado en el capítulo 2, un REM es una opción muy interesante para el eficiente funcionamiento de las redes de *Cognitive Radio*, en especial sobre TVWS. Se encarga de generar un mapa de ocupación espectral procesando toda la información de que dispone para liberar a los dispositivos de realizar todo el ciclo cognitivo. Los dispositivos le hacen una petición al REM con la ubicación en el que se encuentran para conocer los canales libres y éste les proporciona la información sobre los TVWS disponibles para emitir, como si una consulta a una base de datos se tratara (Figura 16). Los datos almacenados deben ser muy precisos y actualizados para la máxima eficiencia de la red y para no perjudicar a los usuarios primarios que tienen legitimidad sobre el espectro.

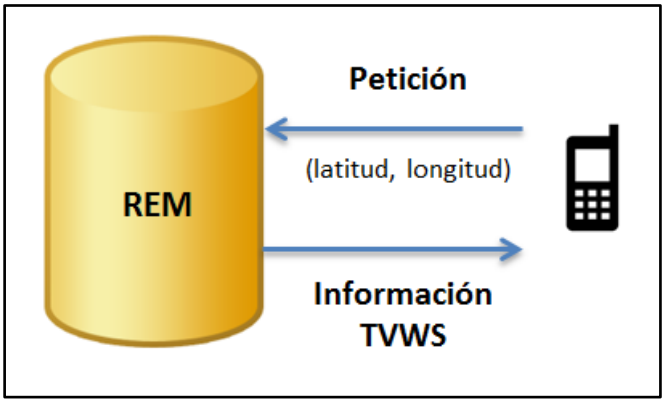


Figura 16. Esquema funcionamiento REM de TVWS

Las técnicas para la construcción de un REM se pueden dividir en dos clases: métodos basados en estadísticas espaciales y métodos basados en la determinación de la ubicación del transmisor [6].

- Métodos basados en estadísticas espaciales

Los métodos basados en estadísticas espaciales describen las propiedades estadísticas de una zona determinada utilizando la correlación espacial de una región. A partir de las mediciones en puntos nodales específicos, se pueden estimar los datos de las zonas que no tienen ninguna medición mediante algoritmos de interpolación (Figura 17). La estimación se basa en el principio de que geográficamente los puntos próximos están más relacionados entre sí en comparación con los puntos más alejados. Una vez se conocen los datos de los puntos que se quieren estimar, ya se puede construir el REM y conocer la información de los TVWS.

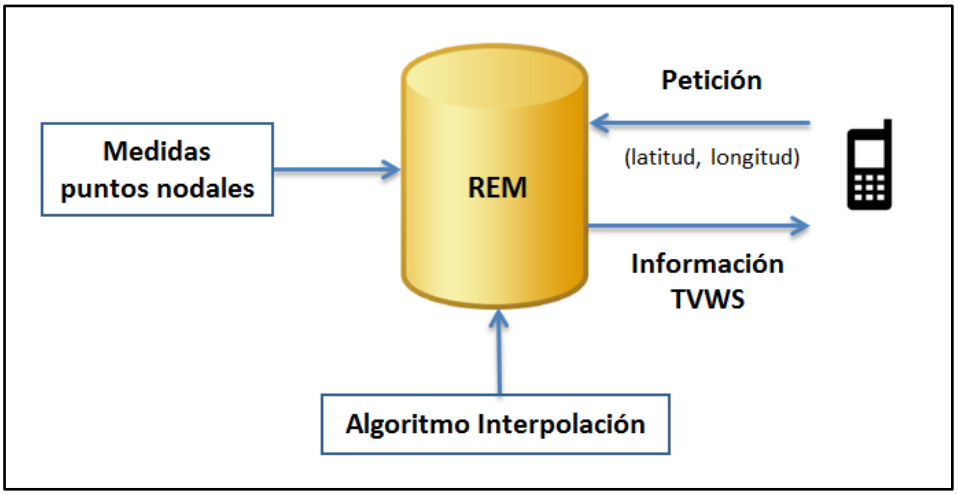


Figura 17. Esquema construcción del REM mediante algoritmos de interpolación y su posterior funcionamiento

En [6] las técnicas de estimación analizadas son los siguientes algoritmos de interpolación: *Nearest Neighbor*, *Inverse Distance Weighted* (IDW) y *Kriging*. Estos métodos permiten que valores de interés en lugares inexplorados puedan ser estimados mediante la combinación lineal ponderada de los datos conocidos. Dados los valores medidos en los puntos nodales (x_n,y_n), los algoritmos de interpolación toman estos valores como entrada y calculan el valor estimado de en el punto (x,y) (Figura 18).

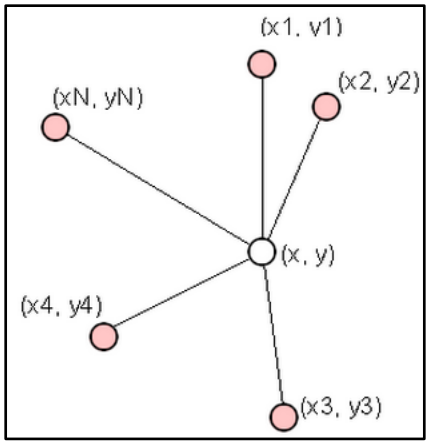


Figura 18. Ejemplo interpolación

El A.I *Nearest Neighbor* se basa únicamente en el punto nodal más cercano para la realización de la estimación y no tiene en cuenta los demás puntos nodales. El A.I IDW se basa en coger los puntos nodales que tiene a su alrededor y darle un peso a cada uno de ellos en función de la distancia a que se encuentran del punto a estimar para realizar la media ponderada. En el caso del A.I *Kriging* también se basa en encontrar pesos para asignarlos a cada uno de los puntos nodales que intervienen en la interpolación. Pero en este caso los pesos son las soluciones de un sistema de ecuaciones lineales que minimiza el error de la estimación.

El volumen de las mediciones, la exactitud requerida en las mediciones, y la densidad de puntos de medición son factores clave que determinan el rendimiento de cada método, sobre todo para los dos últimos casos. A continuación se puede ver el comportamiento del A.I IDW y A.I *Kriging* al estimar un REM y compararlo con el REM original (Figura 19). Como se puede ver el A.I *Kriging* es el que aporta más fiabilidad a la hora de la estimación. Pero según [6], cabe tener en cuenta que el A.I *Kriging* necesita más puntos nodales medidos para que tenga un buen rendimiento.

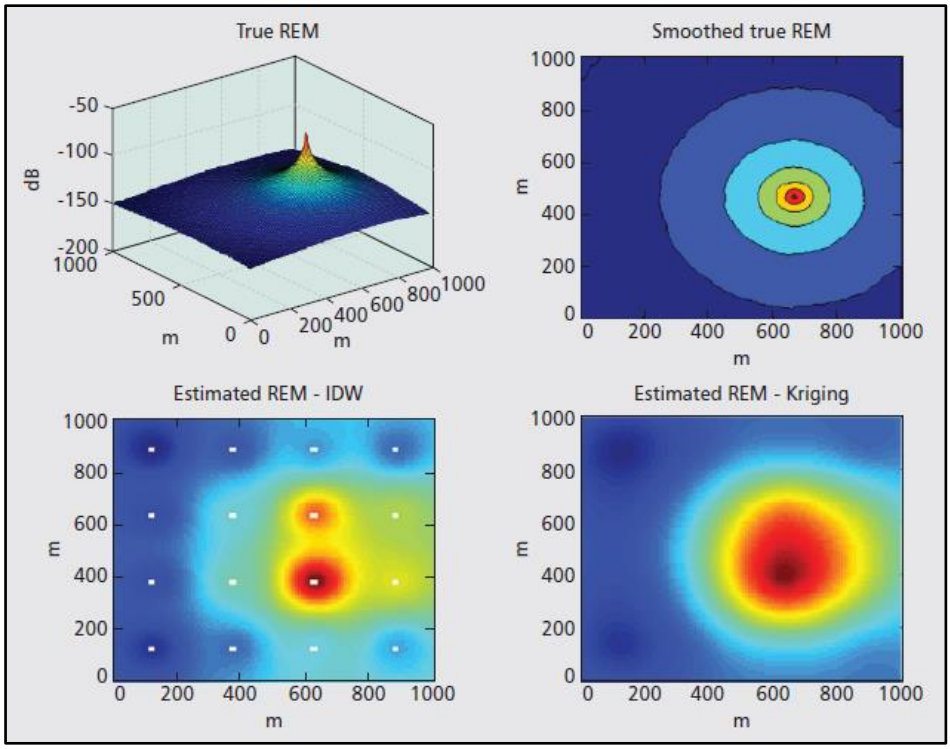


Figura 19. Estimación del REM mediante A.I IDW y A.I *Kriging* y comparación con el REM real

- Métodos basados en la determinación de la ubicación del transmisor

Como su nombre indica, estos métodos están enfocados en la ubicación del transmisor. Posteriormente, se calcula la intensidad de la señal en cada lugar mediante la aplicación de modelos de propagación. Sin embargo, este enfoque tiene muchos grados de libertad debido a los múltiples transmisores, las propiedades del transmisor tales como el patrón de propagación de la antena y la caracterización del entorno de propagación.

En este proyecto se utiliza el método basado en estadísticas espaciales para la estimación del REM a partir de algoritmos de interpolación y los puntos nodales medidos en un escenario previamente definido.

3.2 Algoritmos de Interpolación (A.I)

A continuación se va explicar más detalladamente los algoritmos de interpolación comentados anteriormente y que se van a utilizar en este proyecto, el A.I *Nearest Neighbor*, el A.I IDW y el A.I *Kriging*. Tanto el A.I *Nearest Neighbor* como el A.I IDW nos servirán como referencia para sacar conclusiones sobre el rendimiento del A.I elegido para crear el REM, el *Kriging*.

3.2.1 Algoritmo de Interpolación *Nearest Neighbor*

El A.I *Nearest Neighbor* es uno de los algoritmos más fáciles de implementar. Se basa en el cálculo de la distancia del punto a estimar a los puntos nodales medidos. Una vez tiene todas las distancias, el punto estimado se queda con el valor del punto nodal más próximo (3-1).

$$\widehat{P}(x,y) = \min_{d_n} P(x_n,y_n) \tag{3-1}$$

Este algoritmo es muy simple de realizar pero aporta poca fiabilidad, ya que basa toda su estimación en un solo punto, sin tener en cuenta su entorno. En la Figura 20 [27] se puede ver el comportamiento de aplicar el A.I *Nearest Neighbor* en un escenario donde se estima el color de un mapa dependiendo del color que tenga el punto nodal más cercano.

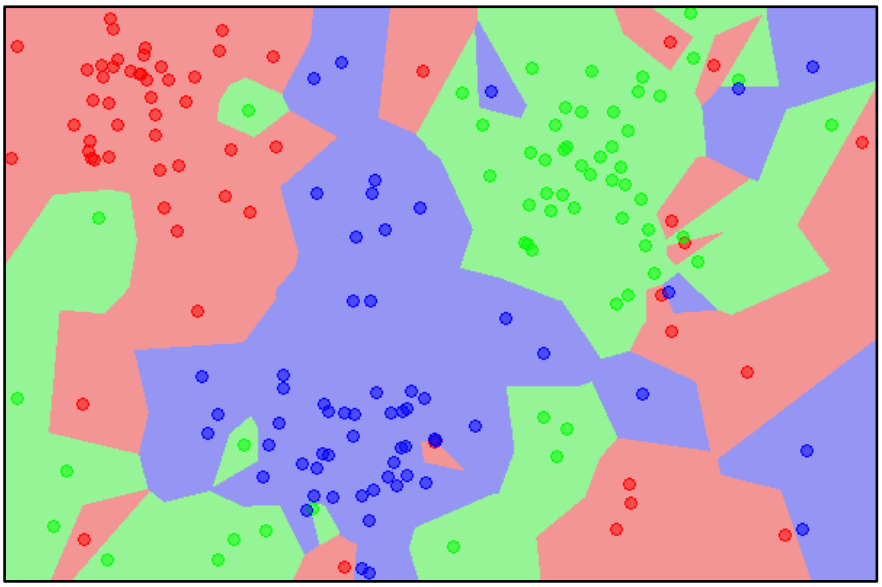


Figura 20. Ejemplo interpolación mediante A.I *Nearest Neighbor*

3.2.2 Algoritmo de Interpolación *Inverse Distance Weighted*

El A.I IDW tiene en cuenta los puntos nodales que tiene a su alrededor y les asigna un peso a cada uno de ellos. Los pesos que se otorgan a cada punto van en función de la distancia. Es decir, a mayor distancia del punto nodal al punto a estimar tendrá un menor peso y por lo tanto una menor importancia en la estimación. El valor de cada punto estimado viene dado por la ecuación (3-2).

$$\widehat{P}(x,y) = \frac{\sum_{n=1}^{N} \frac{P(x_n,y_n)}{d_n^p}}{\sum_{n=1}^{N} \frac{1}{d_n^p}} \qquad (3\text{-}2)$$

Donde $\hat{P}(x,y)$ es el valor del punto a estimar, $P(x_n,y_n)$ es el valor del punto nodal en (x_n,y_n), d_n es la distancia de cada punto nodal al punto a estimar, N es el número de puntos nodales que intervienen en la interpolación y p es la ponderación en función de la distancia. El valor de p controla la región de influencia de cada uno de los puntos nodales. Si p = 0, no hay una disminución con la distancia, ya que cada peso es el mismo y la estimación será la media de los puntos nodales. A medida que p aumenta, los pesos de los puntos que se encuentren a más distancia disminuirán más rápidamente. Si el valor p es muy alto, sólo los puntos circundantes influirán en la estimación. Según [28] se considera un valor por defecto p=2 para obtener resultados precisos. En la Figura 21 se puede ver la relación que tienen los pesos de los puntos nodales a medida que se aumenta la distancia para los diferentes valores de p [29].

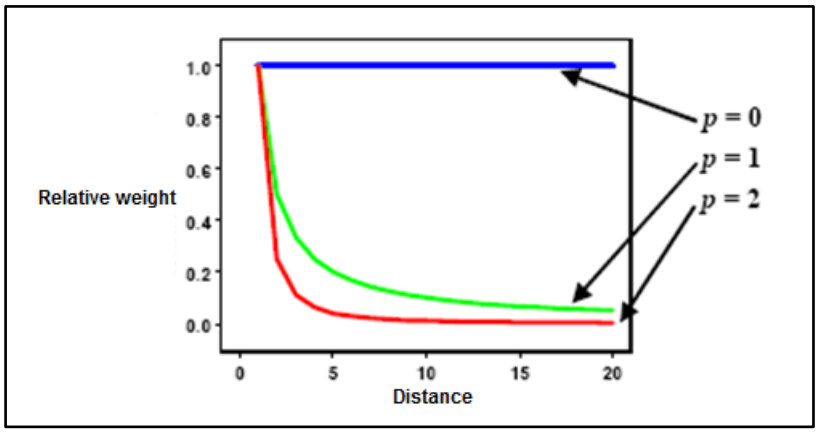


Figura 21. Ponderación en función del parámetro p y la distancia al punto nodal

3.2.3 Algoritmo de Interpolación *Kriging*

El A.I *Kriging* es un método de estimación basado en la ponderación de los puntos que tiene a su alrededor. Parte del principio de que los puntos próximos en el espacio tienden a tener valores más parecidos que los puntos más distantes y que por lo tanto los datos en un espacio determinado se encuentran correlados en el espacio. En el A.I IDW, los pesos dependían únicamente de la distancia de los puntos nodales a la ubicación de predicción. Sin embargo, con el A.I *Kriging*, los pesos no se basan sólo en la correlación entre los puntos medidos y la ubicación del punto a estimar, sino también de la disposición espacial de los puntos nodales medidos y de la correlación entre ellos mismos(Figura 22) [30].

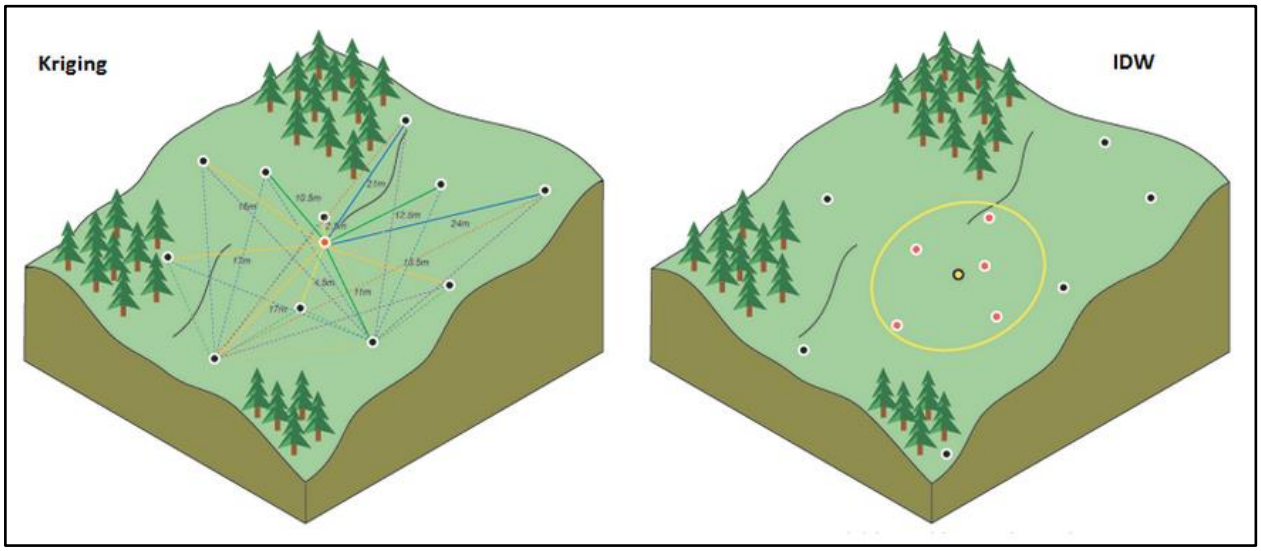


Figura 22.Comparación A.I Kriging y A.I IDW

Se considera el *Kriging* como de tipo ELIO (Estimador Lineal Insesgado Óptimo). Es lineal porque su estimación es una combinación lineal de los puntos nodales; es insesgado porque el valor esperado del error es cero; y óptimo porque garantiza la varianza mínima del error de la estimación. Fue desarrollado por el matemático francés Georges Matheron a partir del proyecto final de Máster que realizó Danie G. Krige, de ahí el nombre de *Kriging*.

Hay dos tipos de métodos para su implementación dependiendo de los conocimientos previos de los resultados, el *Kriging* simple y el *Kriging* ordinario. El primero asume que las medias locales son relativamente constantes de valor muy parecido a una media de la población conocida. Es decir, existe una media conocida que se utiliza para la estimación de cada uno de los puntos conjuntamente con los puntos nodales. En cambio, el *Kriging* Ordinario considera

que las medias locales no son necesariamente próximas a la media de la población y sólo se utilizan los puntos vecinos para realizar la estimación [31][32].

Para el caso que atañe este proyecto relacionado con las señales de televisión, no se dispone de ninguna información acerca de una posible media conocida. En nuestro escenario los resultados varían dependiendo, entre otros factores, de la distancia y de la visibilidad a los centros emisores. Es por este motivo que no se puede establecer una media que sea constante para todo el entorno.

3.2.3.1 *Kriging* ordinario

Para el método *Kriging* ordinario, el valor de cada punto estimado viene dado por la ecuación (3-3). Como se ha dicho anteriormente, este es el método realizado en el presente proyecto para la construcción del REM [31].

$$\widehat{P}(x,y) = \sum_{n=1}^{N} \lambda_n P(x_n,y_n) \tag{3-3}$$

Donde $\hat{P}(x,y)$ es el valor del punto a estimar, $P(x_n,y_n)$ es el valor del punto nodal en (x_n,y_n) , N es el número de puntos nodales que intervienen en la interpolación y λ_n es un vector que contiene el peso que tiene cada uno de los puntos (x_n,y_n) a la hora de realizar la estimación.

Por lo tanto se tienen que encontrar unos valores óptimos para el vector lambda (λ_n) que cumpla con los requisitos del *Kriging* anteriormente detallados para poder llevar a cabo la interpolación. Este vector se obtiene a partir de la ecuación (3-4). Donde C es la matriz de covarianza y c es el vector de covarianza.

$$C\lambda = c \tag{3-4}$$

La función de covarianza nos permite obtener el grado de dependencia espacial entre dos puntos. La magnitud de la función de covarianza entre dos puntos depende de la distancia entre ellos, obteniendo valores mayores para distancias menores y valores menores para distancias mayores.

Para obtener el valor de la covarianza, primero se ha de definir un modelo de la dependencia espacial. Se considera que la función de covarianza sigue un modelo esférico, ya que la

propagación del campo eléctrico también sigue este modelo. La función de covarianza esférica sigue la ecuación (3-5), donde el valor de *h* es la distancia entre los dos puntos que se quiere calcular la covarianza.

$$C(h) = 0.78(1 - 1.5(\frac{h}{d_{max}}) + 0.5(\frac{h}{d_{max}})^3) \quad (3\text{-}5)$$

Según el modelo esférico, para valores de *h* más pequeños que d_{max} , el valor es C(*h*). Pero para los valores de *h* más grandes o iguales que d_{max} , el valor es de C(*h*) es 0. El valor de d_{max} es elegido en función de la distancia entre los puntos nodales y tiene que tener un valor del orden de la máxima distancia entre ellos.

Esta elección de modelo esférico proviene de la forma que sigue el semivariograma (ϒ). La relación existente entre la covarianza y el semivariograma se presenta en la ecuación (3-6).

$$C(h) = C(0) - \gamma(h) \quad (3\text{-}6)$$

Este modelo muestra una disminución progresiva de la autocorrelación espacial entre puntos hasta una cierta distancia (d_{max}), a partir de la cual la autocorrelación es cero. Es decir, a medida que aumenta la distancia entre puntos la relación entre puntos va disminuyendo hasta llegar a una distancia donde la relación es nula (Figura 23) [30].

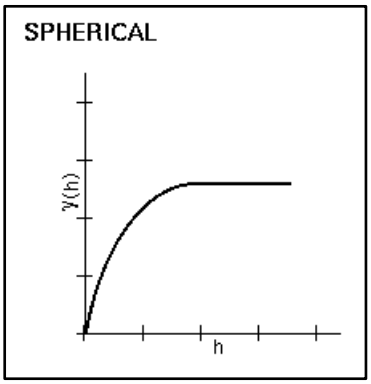


Figura 23. Semivariograma esférico

Una vez conocida la función de correlación se procede a calcular la matriz de covarianza (**C**). Esta matriz contiene el valor de la covarianza entre los N puntos nodales. Además, la última fila y columna contiene valores iguales a 1 excepto el último valor que es un 0 (Figura 24).

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1N} & 1 \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2N} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{N1} & C_{N2} & \cdots & C_{NN} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Figura 24. Matriz de covarianza

En el caso de la matriz de covarianza no se tenía en cuenta el punto a estimar, pero sí que se tiene en cuenta en el vector de covarianza (**c**). El vector de covarianza es un vector que presenta el valor de covarianza de cada uno de los puntos nodales respecto al punto a estimar. Además, el último valor de este vector es un 1 (Figura 25).

$$\boldsymbol{c} = \begin{pmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ \vdots \\ C_{N0} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Figura 25. Vector de covarianza

Resuelta la ecuación (3-4), se tiene listo el vector lambda (**λ**) con cada uno de los pesos (λ_n) para realizar la interpolación y con un último valor que corresponde al parámetro de *Lagrange* (μ) (Figura 26).

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \mu \end{pmatrix}$$

Figura 26. Vector lambda

3.3 Interpolación geográfica

Los algoritmos presentados anteriormente están diseñados para trabajar sobre superficies planas. No habría ningún problema si se utilizaran para llevar a cabo interpolaciones en zonas pequeñas geográficamente ya que se puede considerar que la curvatura de la Tierra no es apreciable entre los diferentes puntos. En este caso se puede considerar esta región como una superficie plana y los algoritmos comentados anteriormente funcionarían correctamente.

El problema aparece cuando se quiere implementar un algoritmo para que funcione en zonas más extensas geográficamente, como el caso del presente proyecto, donde el área de intervención es la zona norte del Área Metropolitana de Barcelona. En este caso sí que afecta la curvatura de la Tierra y la línea recta que separa las coordenadas geográficas de dos puntos no corresponde a la distancia real. Se tiene que buscar un método de proyección para que a partir de unas coordenadas se pueda obtener la distancia simplemente trazando una línea recta entre ellas mediante el teorema de Pitágoras. Es aquí donde aparece el concepto de proyección UTM y de coordenadas UTM.

3.3.1 Coordenadas geográficas: latitud y longitud

Las coordenadas geográficas es un sistema de referencia que nos permite localizar un punto determinado de la superficie terrestre mediante dos coordenadas angulares, latitud y longitud. La latitud mide el ángulo entre cualquier punto y el ecuador. Aquellos puntos que se encuentren al norte del Ecuador reciben la denominación Norte (N) y aquellos que se encuentran al sur la denominación Sur (S). Se mide de 0° a 90° correspondiendo la latitud 0° en el Ecuador. En cambio la longitud mide el ángulo a lo largo del Ecuador desde cualquier punto de la Tierra. Aquellos puntos que se encuentren al oriente del meridiano de Greenwich reciben la denominación Este (E) y aquellos que se encuentran al occidente la denominación de Oeste (O). Se mide de 0° a 180° correspondiendo la longitud 0° al meridiano de Greenwich. Ambas se suelen expresar en coordenadas sexagesimales (grados, minutos y segundos) o en coordenadas decimales (Tabla 1) [33].

Sala D4 Campus Nord	Latitud	Longitud
Coordenas sexagesimales	41º 23' 22.08'' N	2º 6' 43.00'' E
Coordenadas decimales	41.3894 N	2.1119 E

Tabla 5. Ejemplo representación coordenadas sexagesimales y decimales en una sala del edificio D4 del Campus Nord

3.3.2 Coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*): (x,y)

Se recurre a un sistema de proyección cuando la superficie que estemos considerando es tan grande que tiene influencia la esfericidad terrestre en la representación cartográfica.
Cuando la superficie a representar es pequeña y por lo tanto la esfericidad terrestre no influye en la representación cartográfica, se recurre a su representación de forma plana, de forma que todos los puntos representados están vistos desde su perpendicular (Figura 27).

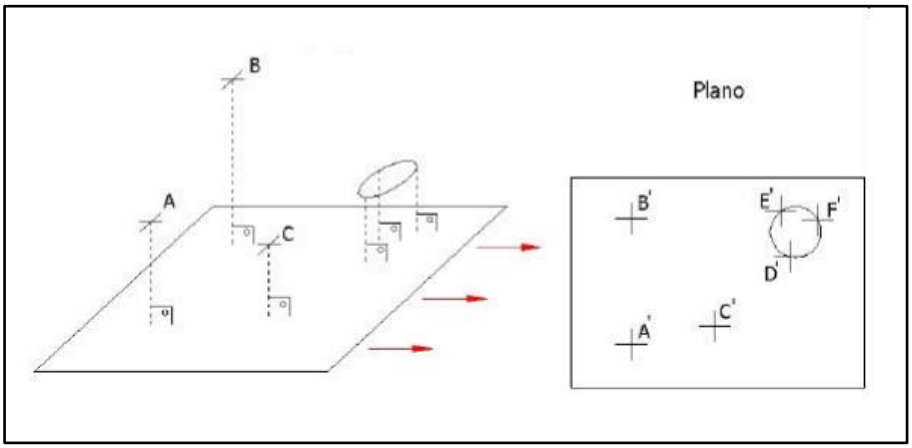


Figura 27. Proyección plana

En proyecciones en las que la esfericidad terrestre tiene una repercusión importante sobre la representación de posiciones geográficas, sus superficies, sus ángulos y sus distancias se utiliza la proyección UTM. El sistema de coordenadas UTM es un sistema de proyección cartográfico basado en cuadrículas que permite referenciar puntos sobre la superficie terrestre. El Ecuador se transforma en una recta que se toma como eje de las x, y el meridiano se transforma en otra recta perpendicular a la anterior como eje Y [34].
La Tierra queda dividida en 60 husos, cada uno formado por 6 grados de longitud. Los husos se numeran correlativamente del 1 al 60 a partir del antimeridiano de Greenwich (180º) (Figura

28). Cada huso se divide horizontalmente, entre 84º de latitud Norte y los 80º de latitud Sur, en 20 bandas entre paralelos. Cada una de estas bandas corresponde con las letras de C a X, excluyendo las letras I, Ñ y O. Las bandas de C a M están en el hemisferio Sur y las bandas de N a X están en el hemisferio Norte. Por lo tanto cada huso queda delimitado en áreas de 6º de longitud y 8º de latitud que se denominan Zonas y constituyen la cuadrícula UTM [35].

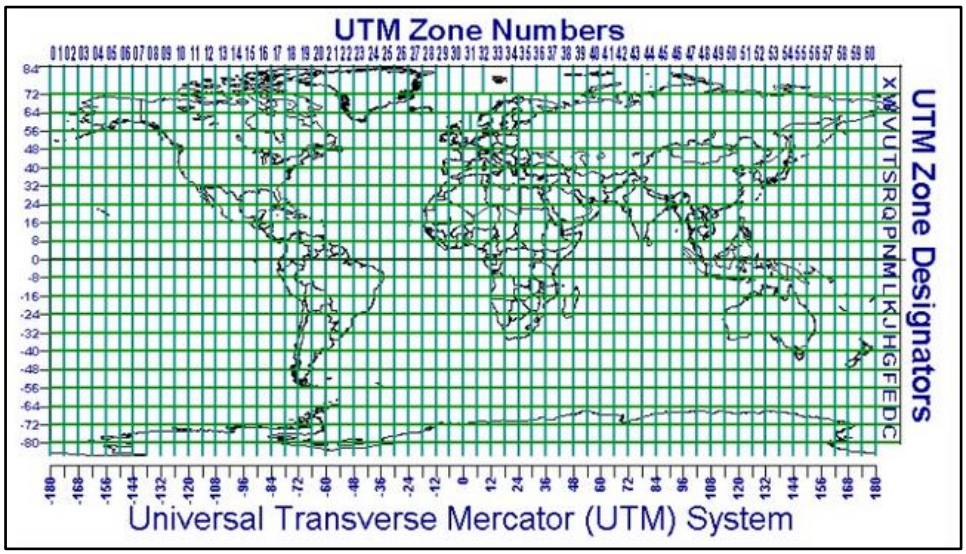


Figura 28. Sistema de coordenadas UTM

Una coordenada UTM no corresponde a un punto determinado, corresponde a un área cuadrada cuyo lado depende del grado de resolución de la coordenada y cualquier punto que se encuentre dentro de esta cuadrícula tiene la misma coordenada.

En la Tabla 6 se puede ver un ejemplo de cómo se representan las coordenadas UTM, en concreto para una sala del edificio D4 del Campus Nord.

Sala D4 Campus Nord	Coordenadas UTM
X	425754
Y	4582371
Huso	31
Zona	T

Tabla 6. Ejemplo representación coordenadas UTM en una sala del edificio D4 del Campus Nord

En el presente proyecto, a la hora de la construcción del REM y de la implementación de los algoritmos de interpolación, se convierten las coordenadas geográficas a UTM para poder calcular exactamente las distancias entre puntos.

4. Instrumentación y campaña de medidas

En este capítulo se detallan todos los equipos utilizados para la realización de las medidas de los diferentes puntos en el espectro televisivo, analizando cada elemento que interviene en la medición y su posterior configuración. También se detallan el montaje del equipo de medidas, la metodología utilizada para realización de las medidas y en qué formato se obtienen.
Finalmente se explica cómo se ha diseñado el escenario de medidas, la razón por la cual se ha elegido esta distribución de puntos y el procedimiento utilizado para la medición en el escenario real.

4.1 Equipo y esquema de medidas

A continuación se especifica uno por uno los elementos necesarios para llevar a cabo las medidas de potencia en la banda de televisión.

4.1.1 Esquema de medidas

En la Figura 29 se puede ver el esquema diseñado en este proyecto para realizar las medidas.

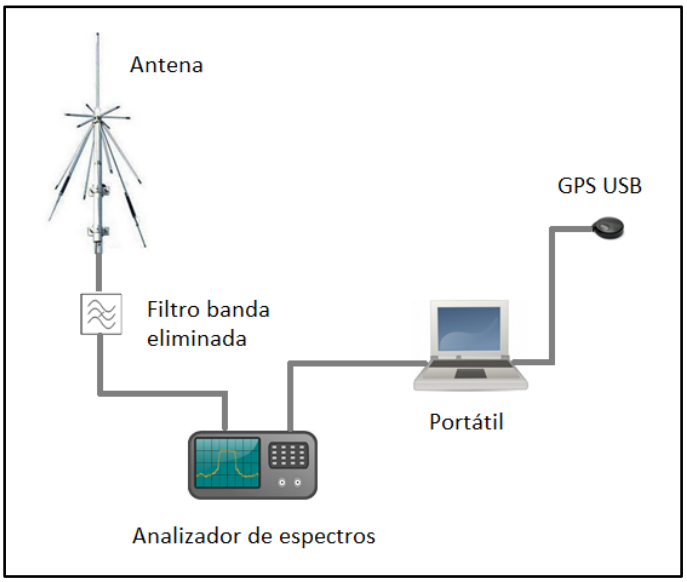


Figura 29. Esquema de medidas

El esquema está formado por un analizador de espectros, una antena, un filtro elimina banda, un dispositivo GPS y un portátil con el programa Matlab.

4.1.2 Analizador de espectros

El analizador de espectros utilizado en este proyecto fue el *Anritsu Handheld Spectrum Anlyzer MS2721B* (Figura 30). Se utiliza éste en vez del otro analizador que dispone el Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles de la UPC, el *R&S FSL6 Spectrum Analyser*, ya que el primero es portátil y es mucho más manejable para desplazarse a realizar las mediciones dentro del Área Metropolitana de Barcelona (AMB).

Figura 30. Anritsu Handheld Spectrum Anlyzer MS2721B

Este analizador está basado en los principios del receptor superheterodino y permite trabajar en la banda que va de los 9 KHz hasta los 7,1 GHz [36].

4.1.3 Antena

Para poder captar las señales en la banda de televisión se ha utilizado una antena discono AOR DA753G (Figura 31) [37] polarizada verticalmente con diagrama de recepción omnidireccional. Aunque algunas señales de televisión se emiten polarizadas horizontalmente, con esta antena se puede captar la señal igualmente debido a la alta potencia de las emisiones. Esta antena cumple con los requisitos ya que permite captar señales entre 75 MHz y 3 GHz, dentro del cual se encuentra la banda de frecuencias dedicada a la TDT.

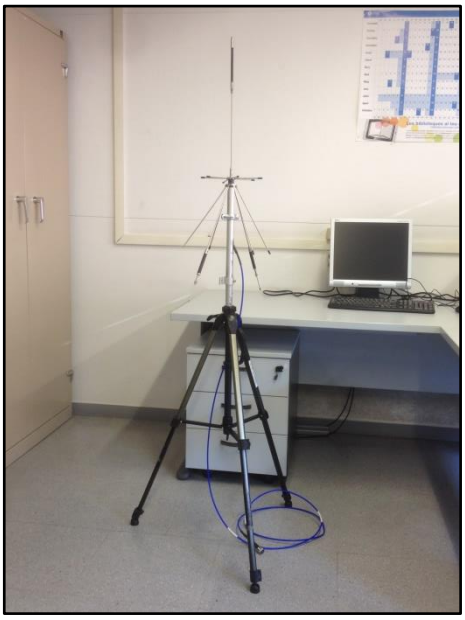


Figura 31. Antena discono AOR DA753G

Como se puede apreciar en la Figura 31 se le ha añadido un trípode para sujetar la antena a la hora de la medición y con una altura equivalente a un humano de pie para ganar fiabilidad en las medidas.

4.1.4 Filtro elimina banda

El dispositivo utilizado para realizar esta función es el filtro elimina banda Mini Circuits NSBP-108+ (Figura 32) [38]. El objetivo de este filtro es el de reducir las interferencias producidas por las señales FM, las cuales se encuentran entre los 88 y 108 MHz.

Figura 32. Filtro elimina banda Mini Circuits NSBP-108+

Las principales interferencias producidas por las señales FM son las siguientes: interferencia de desensibilización e interferencia de intermodulación (Figura 33).

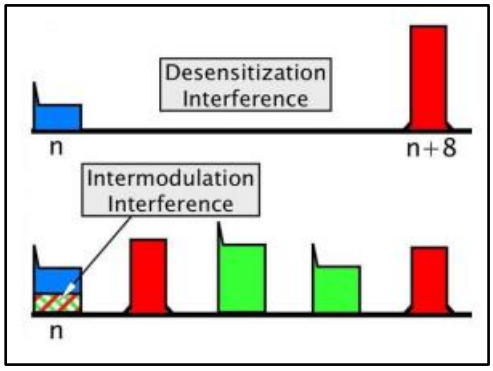


Figura 33. Principales interferencias debido a señales FM

La interferencia de desensibilización se produce con la existencia de una señal potente fuera de banda causando una saturación en el receptor. La interferencia de intermodulación se produce cuando se mezclan dos o más señales en un dispositivo no lineal provocando productos de intermodulación que pueden llegar a coincidir con las señales deseadas.

4.1.5 GPS

El instrumento utilizado para detectar las coordenadas de los puntos de medición será el Garmin GPS 18x USB (Figura 34). Este GPS se puede conectar vía USB al portátil y a través de unas funciones que proporciona el fabricante y Matlab se pueden obtener las coordenadas [39]. El analizador de espectros Anritsu también dispone de una herramienta GPS, pero finalmente se ha decidido utilizar el Garmin GPS debido a la integración con Matlab, precisión y facilidad a la hora de realizar la configuración.

Figura 34. Garmin GPS 18x USB

4.1.6 Portátil con el programa Matlab

Para poder realizar las funciones y los *scripts* con Matlab se ha utilizado un portátil con sistema operativo Windows XP (Figura 35). A la hora de realizar las medidas el portátil nos ha servido sobre todo para ejecutar la función que configure el analizador de espectros y que inicie la medición y para almacenar los resultados.

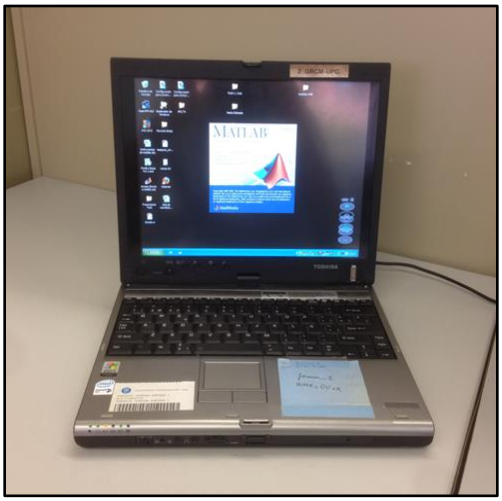


Figura 35. Portátil con el programa Matlab

4.1.7 Cables y conectores

Para la interconexión entre los diferentes elementos se han utilizados dos tipos de cables. Un cable Ethernet para conectar el analizador de espectros y el portátil y un cable coaxial para conectar la antena con el analizador de espectros.

4.2 Metodología de medición

A continuación se detalla cuál ha sido la metodología para realizar las mediciones. Empezando por la configuración, siguiendo por el procedimiento de medición realizado en la universidad a modo de prueba y por último detallando cómo se almacenan las medidas del analizador de espectros. Se ha de tener en cuenta que las mediciones se han realizado en la banda 470-860 MHz, es decir, del canal 21 al canal 69 para un total de 49 canales. Aunque actualmente todos los canales de televisión emiten en la banda 470-790 MHz, todavía se realizan emisiones en

simulcast por la banda 790-862 MHz correspondiente al Dividendo Digital. (apartado 2.2.3.2). Por este motivo se ha decidido hacer un análisis completo de toda la banda, del canal 21 al canal 69.

4.2.1 Configuración de los equipos

En especial en este apartado se explica la configuración del analizador de espectros. La configuración se realiza mediante una función con Matlab que se comunica con el analizador de espectros vía Ethernet mediante el *Instrument Control Toolbox* de Matlab. Los comandos que se ejecutan en la función están en formato SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*) y la transferencia de datos se realiza sobre TCP/IP con el estándar VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*).

La función realizada, aparte de iniciar la conexión con el analizador de espectros y configurarlo, también se encarga de establecer la conexión con el dispositivo GPS, extraer las coordenadas y almacenar los datos medidos.

La función tiene como *inputs* el nombre del punto con el que se guarda el archivo y el número de barridos que se llevan a cabo. La configuración que se ha realizado en el analizador de espectros es la siguiente:

- **Escala eje y (dB/division):** 10 dB
- **Nivel de referencia amplitud:** -50 dBm
- **Nivel de referencia offset:** 0 dB
- **Preamplificador:** ON
- **Atenuación de entrada:** 10 dB
- **Promediado:** SI
- **Número de trazas a promediar:** 50
- **Número de barridos:** 1
- **Ancho de banda de resolución (RBW):** 30 KHz
- **Ancho de banda de video (VBW):** 100 KHz
- **Sweep Time mínimo:** 50 µs

Se ha decidido activar el preamplificador ya que permite reducir el ruido interno y esto resulta en una mejor apreciación de la señal. Se puede correr el riesgo de que con esta configuración en algunos puntos con visibilidad directa a los centros emisores pueda llegar a saturarse la

señal. Pero esto se verá más adelante en los próximos apartados cuando se explique cómo se han medido los puntos en el escenario de medición.

Otros parámetros importantes son el promediado y las trazas. Con esta configuración se realizan 50 medidas en cada canal y el analizador de espectros hace un promediado de ellas. Una vez ha terminado de realizar las 50 medidas y el promediado de cada uno de los 49 canales del espectro televisivo, vuelve a realizar el mismo procedimiento tantas veces como barridos le especifiquemos como *input* en la función. En el caso de esta configuración se realiza un solo barrido por cada medición.

4.2.2 Procedimiento medición

Primero de todo se realizaron mediciones en un aula del D4 para coger práctica y soltura con el procedimiento a la hora de ir al escenario real y no tener ninguna duda. Una vez montados todos los equipos (Figura 36), se procedió a realizar las primeras medidas. Para iniciar las medidas simplemente se tuvo que ejecutar la función comentada anteriormente y esperar a que termine el proceso.

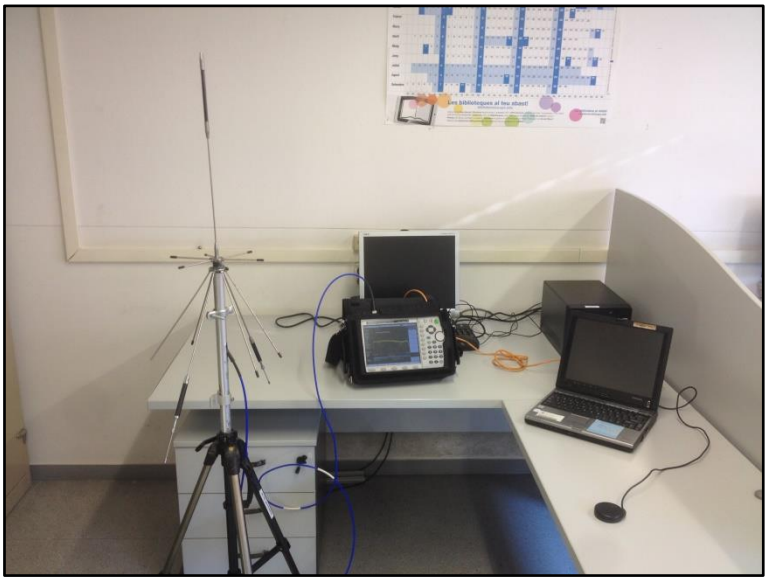


Figura 36. Montaje equipos de medida

Las mediciones que se llevaron a cabo fueron con un solo barrido y un promediado de 50 trazas. Ya que ésta sería la configuración que se realizaría para llevar a cabo las medidas en el escenario real, se calculó el tiempo que tardaban para hacer un cálculo de cuántos puntos se

podían llegar a medir en un día. Cada medida de un punto requería un tiempo de unos 25 minutos aproximadamente.

4.2.3 Almacenamiento de datos

La función implementada también permite almacenar los datos medidos en archivos específicos para Matlab con formato .mat. Los archivos resultantes son los siguientes:

- **Nombre_Punto-GPSLocation00001.mat (<1x6>):** coordenadas en D°M'S.s" provenientes del dispositivo GPS Garmin.

- **Nombre_Punto-Potencias00001.mat (<1x49>):** promedio de la potencia para cada uno de los 49 canales. El promedio se realiza a partir de las 50 trazas medidas.

- **Nombre_Punto-Amp_single00001.mat (<1x29651>):** promedio de la amplitud de las 551 muestras por canal para cada uno de los 49 canales. El promedio se realiza a partir de las 50 trazas medidas.

- **Nombre_Punto-Frequencies00001.mat (<1x29651>):** frecuencia de cada una de las 551 muestras por canal para cada uno de los 49 canales.

- **Nombre_Punto-Dates00001.mat (<1x6>):** fecha y la hora del inicio de la medida en formato año, mes, día, horas, minutos y segundos.

4.3 Medidas para la construcción del REM

En este apartado se detalla cómo se ha planificado el escenario de medidas y una vez realizado cómo se han llevado a cabo las mediciones en el escenario real.

4.3.1 Planificación del escenario de medidos

Para realizar la planificación se utilizó la aplicación *Google Earth,* ya que permite representar los diferentes puntos en un mapa insertando las coordenadas y trabajar con archivos en formato KML para representar datos geográficos en tres dimensiones. Se pueden importar

archivos de éste tipo para poder delimitar cada municipio [40] y además, se pueden exportar los puntos plasmados en el mapa.

La planificación de los puntos a medir parte del trabajo que realizó el anterior proyectista Pedro Delicado que trabajó en este proyecto e hizo medidas a lo largo de la zona norte del AMB con una resolución entre puntos de unos 2 Km aproximadamente. En la Figura 37 se puede apreciar la distribución de puntos que se disponía:

Figura 37. Esquema de puntos realizado por el anterior proyectista

La idea inicial del proyecto era crear y validar un REM de TVWS y ampliar los puntos medidos en la zona norte del AMB. Algunos de los puntos medidos tenían que servir como puntos nodales para crear el REM y otros para validar los puntos estimados a partir de los algoritmos de interpolación.

Una vez analizado el proyecto, se decidió con Anna Umbert realizar lo comentado anteriormente pero centrándose en una región determinada del AMB norte. Esto se hizo para poder reducir la resolución entre puntos nodales y así poder ver la mejora de los algoritmos de interpolación al disminuir la distancia entre puntos nodales.

Finalmente se optó por la región de Badalona y alrededores para realizar la campaña de medidas. Esta decisión se tomó en base a que la zona era propicia para realizar medidas y no tenía tanta interferencia debido a la montaña de Collserola como en la zona de Sant Cugat del Vallès y en la zona de Cerdanyola del Vallès. Además, permitía realizar las validaciones del

REM en entornos distintos, como por ejemplo en un entorno urbano y en un entorno suburbano montañoso.

En primera instancia la idea era utilizar los puntos anteriormente medidos por Pedro Delicado como puntos nodales (Figura 37) e ir aumentándolos para conseguir una resolución de 1 Km entre puntos. Pero una vez realizadas las primeras medidas de prueba en el laboratorio se observó que la potencia en los canales había cambiado considerablemente debido a la reordenación del espectro televisivo realizado para llevar a cabo la liberación del Dividendo Digital (apartado 2.2.3).

Puesto que se quería realizar un análisis detallado y con el menor margen de error posible para conocer a ciencia cierta el potencial del algoritmo de interpolación elegido, el *Kriging*, se decidió que se volverían a medir estos puntos.

En la Figura 38 se pueden ver los puntos nodales anteriormente medidos en la región de Badalona y alrededores por el anterior proyectista y que posteriormente se volvieron a medir.

Figura 38. Puntos medidos con anterioridad por el anterior proyectista en la región de Badalona y alrededores y que se volvieron a repetir

A continuación, se añadieron ocho puntos nodales más en la ciudad de Badalona y alrededores consiguiendo una resolución de 1 Km entre puntos (Figura 39). Se decidió seguir la misma notación con el nombre de la ciudad y el número de punto para los puntos anteriormente diseñados. En cambio, para los nuevos puntos nodales se decidió llamarlos nodal más el número del punto. Esto se hizo para poder diferenciar los dos diseños y poder realizar modificaciones más fácilmente a la hora de analizar los resultados.

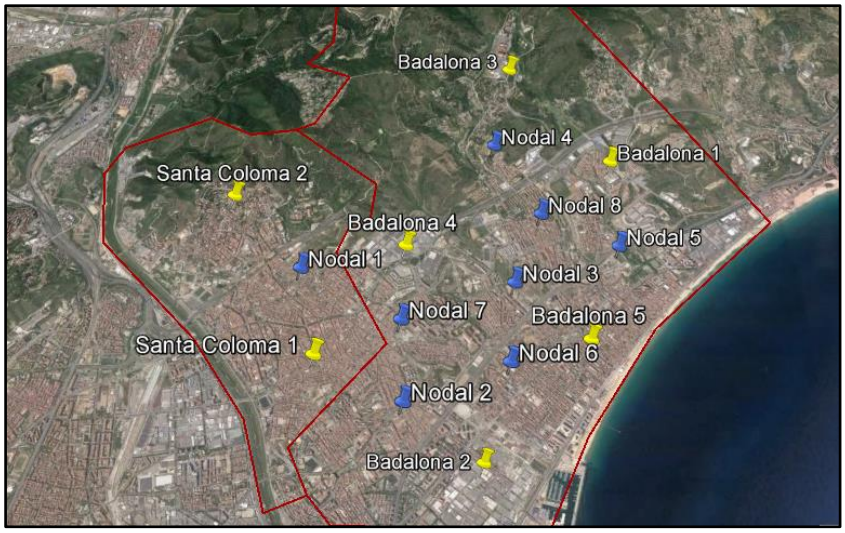


Figura 39. Puntos nodales en la región de Badalona y alrededores

Una vez se diseñó esta distribución, se procedió a añadir puntos que sirvieran para poder validar la estimación que realizan los algoritmos de interpolación al crear el REM a partir de los puntos nodales. Estos puntos reciben el nombre de puntos de validación.

Concretamente se diseñaron tres puntos para la validación en cada una de las zonas de estudio:

- Zona 1: Punto Validación 1

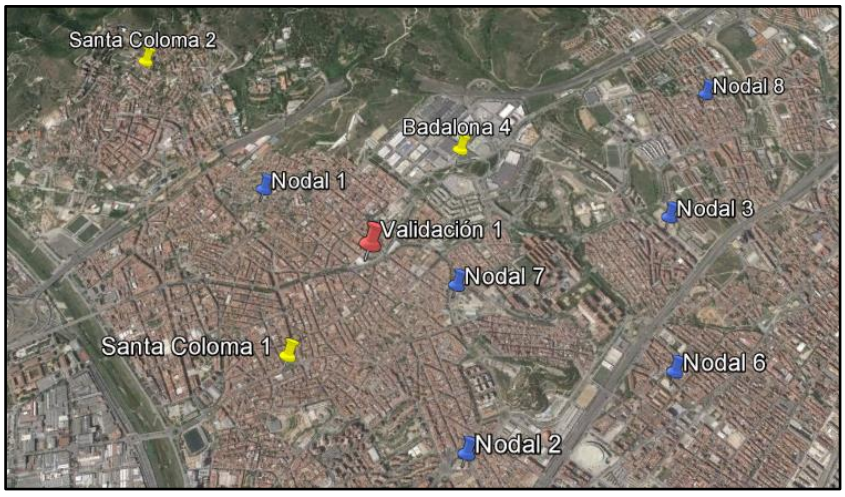


Figura 40. Ubicación punto Validación 1

En este caso el punto Validación 1 (Figura 40) se encuentra en un entorno urbano.

- Zona 2: Punto Validación 2

Figura 41. Ubicación punto Validación 2

El punto Validación 2 (Figura 41) también se encuentra en un entorno urbano.

-Zona 3: Punto validación 3

Figura 42. Ubicación punto Validación 3

En este último caso (Figura 42) el punto se encuentra en un entorno suburbano montañoso.

Finalmente, el escenario global a medir fue de quince puntos nodales y tres puntos de validación y quedó de la siguiente forma (Figura 43):

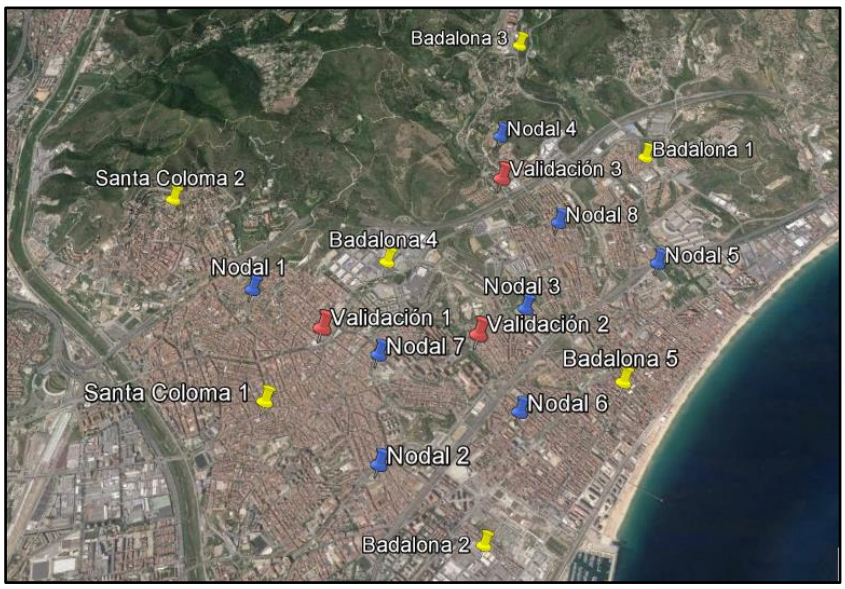


Figura 43. Escenario global a medir de los puntos nodales y de los puntos de validación

4.3.2 Procedimiento medición en entorno real

Una vez diseñado el esquema de puntos, el siguiente paso fue la realización de las medidas. Se llevaron a cabo en el mes de noviembre distribuidas en cuatro días para un total de dieciocho puntos medidos.

El procedimiento fue el mismo durante los cuatro días. Primero de todo se iba a la universidad a recoger los equipos y a partir de ese instante empezaba la ruta de mediciones. Se decidió realizar un orden el cual permitiese realizar el mayor número de mediciones en el menor número de tiempo posible debido a la autonomía de las baterías. Para poder llegar hasta el punto deseado se utilizó la aplicación del móvil TomTom, ya que nos permite insertar las coordenadas geográficas.

Una vez llegado al punto de medición se procedió a estacionar el vehículo lo más cercano posible al lugar donde marcan las coordenadas. Una vez aparcado, se sacaron todos los equipos, se realizaron todas las conexiones y se ejecutó la función encargada de realizar la medición. La medición duró aproximadamente unos veinticinco minutos por punto. En la Figura 44 y Figura 45 se muestra el montaje realizado en un punto de medición.

Figura 44. Montaje realizado en el punto de medida

Figura 45. Montaje realizado en el punto de medida

Finalizada la medición, el siguiente paso fue comprobar que los resultados se hubieran guardado correctamente y que fueran coherentes con lo esperado. Y así para los dieciocho puntos.

Todas las mediciones fueron realizadas con el preamplificador activado y una atenuación de entrada de 10 dB. Aunque algunos de los puntos medidas tuvieran buena visibilidad respecto la Torre de Collserola, no se llegó a saturar la señal en ninguno de los casos. Además, las medidas se realizaron de la misma forma que en el entorno de prueba, promediado de 50 trazas con un solo barrido.

Cabe destacar que en algunos casos fue difícil acceder a esos puntos planificados ya que los puntos se encontraban en zonas donde no se podía estacionar el vehículo o en sitios donde no se podía acceder de ningún modo. A pesar de esto, la máxima distancia desde el punto medido respecto a lo que se había planificado fue de unos 70 metros. Se considera que esta distancia respecto a una resolución entre puntos de 1 Km no es significativa.

Por último, añadir que las medidas fueron realizadas en noviembre, una vez ya se había producido la reordenación del espectro para la liberación del Dividendo Digital (apartado 2.2.3). Como se ha dicho anteriormente, aunque todos los nuevos canales de TDT ya se encuentran emitiendo en la banda 470-790 MHz, se decidió medir toda la banda 470-862 MHz (canales 21-69) igualmente ya que todavía algunos canales seguían emitiendo en *simulcast* en la banda del Dividendo Digital (790-862 MHz) a través de sus frecuencias antiguas para facilitar la implantación a los ciudadanos.

5. Construcción del REM de TV *White Spaces*

Una vez realizada la campaña de medidas en la región de Badalona y alrededores, el siguiente paso es procesar los datos para llevar a cabo uno de los objetivos principales del proyecto, crear un REM de TVWS.

Primero de todo se explica cómo se ha calculado el umbral de potencia capaz de decidir sobre si un canal es un TVWS o no. A continuación se detalla qué estructura tienen los puntos que forman parte del REM y cómo se han procesado todos los datos para formar el REM mediante Matlab y utilizando el algoritmo de interpolación elegido, el *Kriging*.

5.1 Cálculo umbral de decisión

Para decidir sobre la existencia de un TVWS se decidió calcular un umbral de decisión a partir del cual si la potencia recibida en un canal es inferior a este umbral, este canal es declarado como un TVWS. En cambio, se muestra como ocupado si la potencia recibida excede el umbral de decisión.

Cabe tener en cuenta que el umbral de decisión elegido es un parámetro muy importante, ya que si se elige un umbral alto se podría llegar a considerar alguna pequeña señal como ruido y asignar ese canal como libre pudiendo interferir a los usuarios primarios. Por el contrario, un umbral de decisión bajo podría llegar a considerar un canal libre como ocupado perdiendo gran cantidad de recursos al desaprovecharse canales que no están siendo usados por ningún usuario legítimo.

Finalmente, en base a estudios realizados por el grupo de investigación en comunicaciones móviles (GRCM) de la UPC [41], se eligió un umbral de decisión con una probabilidad de falsa alarma (PFA) del 1% como la mejor opción para este proyecto. Es decir, hay un 1% de probabilidad de que un canal que realmente está libre aparezca como ocupado.

Para calcular el umbral de cada uno de los 49 canales se necesita el nivel de ruido del sistema. Para obtener el nivel de ruido de cada canal se realizó una medida como en los casos anteriores, pero en vez de conectar la antena al analizador de espectros, se le conectó una carga adaptada de 50 Ω. A diferencia de las otras medidas, en este caso se realizaron 30 barridos y a continuación un promediado de todos ellos.

Una vez obtenida la potencia para cada uno de los canales se procedió a calcular el percentil 99 (P_{99}) para obtener el umbral de potencia. El P_{99} permite obtener la potencia para la cual

encontrar una potencia de ruido mayor tiene una probabilidad del 1%. Es decir, ofrece la potencia umbral con una probabilidad de falsa alarma del 1%.

Una vez conocido el umbral de decisión, ya se puede realizar una comparación de la potencia por canal de los puntos con el umbral de decisión. En este caso, se realiza a modo de ejemplo la comparación con el punto nodal Badalona 1 (Figura 46).

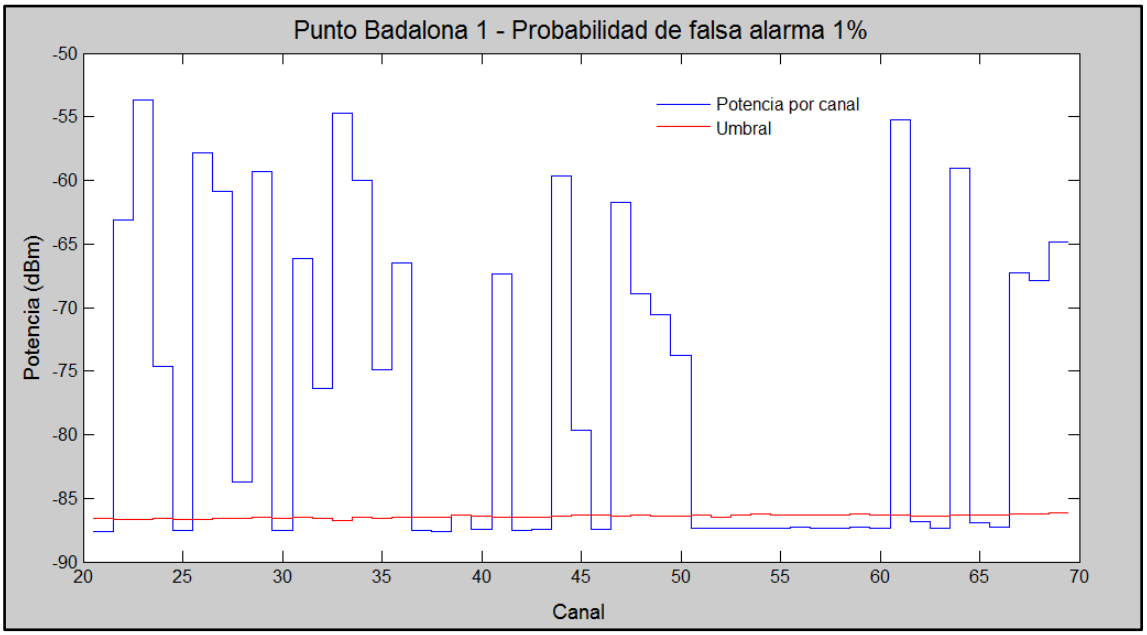


Figura 46. Comparación potencia por canal del punto nodal Badalona 1 y umbral de decisión con probabilidad de falsa alarma del 1 %

Además, ya se puede hacer un análisis de qué canales están libres y se consideran como TVWS y qué canales están ocupados para cada uno de los puntos nodales (Tabla 7).

Canales	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
Umbral de decisión	-86.62	-86.68	-86.67	-86.61	-86.63	-86.69	-86.59	-86.62	-86.49	-86.59	-86.49	-86.55	-86.72	-86.50	-86.57	-86.46	-86.50	-86.48	-86.30	-86.37	-86.47	-86.46	-86.46	-86.44	-86.32	-86.33	-86.41	-86.36	-86.45	-86.37	-86.34	-86.45	-86.34	-86.25	-86.33	-86.34	-86.32	-86.30	-86.25	-86.32	-86.33	-86.39	-86.37	-86.29	-86.28	-86.33	-86.22	-86.27	-86.13
Punto Badalona 1	-87.76	-83.25	-53.86	-74.77	-87.73	-57.99	-61.05	-83.85	-59.47	-87.65	-66.36	-76.55	-54.89	-60.21	-75.04	-66.64	-87.68	-87.76	-86.50	-87.64	-67.55	-87.69	-87.65	-59.79	-79.83	-87.59	-61.94	-69.09	-70.77	-73.91	-87.51	-87.55	-87.53	-87.55	-87.46	-87.47	-87.53	-87.51	-87.41	-87.52	-55.43	-86.98	-87.52	-59.25	-87.09	-87.39	-67.45	-68.08	-65.03
Punto Badalona 2	-87.81	-77.08	-65.44	-83.82	-87.69	-64.41	-63.72	-84.98	-64.09	-87.52	-67.15	-76.91	-65.21	-66.80	-72.26	-67.25	-87.48	-87.74	-84.42	-87.18	-70.89	-87.72	-87.67	-65.26	-87.09	-87.54	-70.12	-70.19	-83.64	-87.61	-87.55	-87.53	-87.53	-87.53	-87.38	-87.44	-87.39	-87.38	-87.47	-87.52	-67.31	-87.42	-87.49	-74.03	-87.34	-87.45	-68.28	-69.31	-72.82
Punto Badalona 3	-88.17	-69.98	-58.56	-80.22	-88.21	-63.15	-57.91	-79.29	-67.16	-88.15	-64.83	-77.47	-64.56	-60.09	-83.88	-71.81	-87.96	-88.05	-73.67	-87.96	-57.76	-88.01	-87.94	-57.17	-77.32	-87.85	-58.55	-68.34	-74.58	-72.04	-87.82	-87.88	-87.87	-87.89	-87.81	-87.81	-87.78	-87.81	-87.77	-87.80	-58.81	-87.44	-87.73	-63.05	-87.72	-87.66	-61.88	-65.20	-64.63
Punto Badalona 4	-88.05	-57.93	-49.06	-81.90	-88.20	-58.18	-51.71	-80.13	-55.52	-87.95	-59.58	-67.88	-54.61	-52.79	-77.22	-58.76	-87.96	-88.10	-78.84	-88.02	-55.17	-88.02	-87.87	-56.38	-81.39	-87.94	-55.59	-60.08	-61.75	-66.32	-87.72	-87.90	-87.85	-87.90	-87.75	-87.73	-87.83	-87.78	-87.81	-87.85	-55.57	-87.66	-87.79	-63.20	-87.69	-87.73	-67.73	-62.42	-62.81
Punto Badalona 5	-87.54	-74.44	-69.05	-84.62	-87.72	-67.94	-66.55	-87.25	-70.60	-87.56	-74.20	-81.56	-72.04	-71.67	-83.70	-80.11	-87.22	-87.55	-86.60	-87.46	-70.46	-87.59	-87.41	-70.59	-85.89	-87.25	-76.71	-74.12	-87.31	-86.53	-87.32	-87.32	-87.37	-87.38	-86.80	-87.25	-87.30	-87.24	-87.21	-87.25	-73.89	-86.63	-87.32	-78.62	-87.13	-87.13	-81.89	-80.75	-81.20
Punto Santa Coloma 1	-86.13	-63.44	-66.41	-84.79	-87.37	-67.28	-66.13	-83.95	-67.52	-87.74	-64.55	-82.02	-62.31	-63.41	-82.29	-70.40	-87.76	-87.89	-86.57	-87.58	-66.11	-87.84	-87.81	-65.77	-82.59	-87.50	-62.73	-70.36	-87.56	-78.71	-87.47	-87.19	-87.04	-87.51	-87.63	-87.62	-87.63	-87.66	-87.35	-87.65	-65.64	-87.59	-87.65	-67.38	-87.51	-87.57	-69.64	-69.72	-72.14
Punto Santa Coloma 2	-87.33	-59.96	-57.78	-87.12	-87.94	-63.36	-61.64	-84.60	-64.23	-88.14	-60.48	-78.41	-60.40	-65.36	-81.33	-66.50	-87.90	-88.05	-78.00	-87.89	-63.95	-88.02	-87.92	-60.47	-89.81	-87.53	-66.26	-73.96	-87.68	-73.88	-87.88	-87.88	-87.76	-87.78	-87.82	-87.81	-87.84	-87.84	-87.75	-87.78	-66.74	-87.62	-87.65	-87.76	-87.67	-87.45	-87.59	-69.39	-69.60	-68.25
Punto Nodal 1	-87.61	-67.50	-67.66	-81.10	-87.92	-68.33	-69.75	-86.35	-68.80	-88.09	-69.30	-78.46	-71.23	-67.38	-84.00	-72.10	-87.85	-88.14	-86.23	-88.00	-72.34	-88.06	-87.95	-65.67	-86.85	-87.66	-69.07	-78.01	-87.31	-80.56	-87.81	-87.86	-87.80	-87.88	-87.76	-87.79	-87.80	-87.71	-87.66	-87.71	-72.05	-86.78	-87.80	-73.81	-87.56	-87.64	-73.74	-76.43	-75.69
Punto Nodal 2	-87.83	-70.12	-63.34	-83.67	-80.73	-72.25	-68.62	-84.64	-70.55	-87.62	-67.08	-84.13	-67.05	-70.80	-87.02	-83.71	-87.69	-87.86	-86.39	-87.69	-72.14	-87.85	-87.70	-72.75	-80.93	-87.28	-68.99	-75.29	-87.65	-87.45	-87.67	-87.70	-87.72	-87.68	-87.59	-87.67	-87.67	-87.65	-87.62	-87.64	-75.78	-87.46	-87.43	-75.39	-87.55	-87.11	-72.29	-68.91	-73.57
Punto Nodal 3	-87.81	-80.99	-76.73	-80.70	-87.89	-79.19	-77.68	-87.31	-77.39	-87.58	-76.27	-86.88	-77.91	-75.89	-87.69	-82.41	-87.10	-87.26	-87.53	-87.78	-76.83	-87.87	-87.78	-74.92	-85.78	-87.76	-76.22	-79.35	-85.79	-87.06	-87.75	-87.77	-87.76	-87.69	-87.63	-87.67	-87.65	-87.64	-87.61	-87.62	-73.78	-87.37	-87.51	-78.27	-87.61	-87.60	-82.11	-80.31	-80.74
Punto Nodal 4	-87.98	-64.21	-54.38	-86.23	-87.83	-59.01	-56.56	-80.98	-58.84	-87.75	-56.38	-72.82	-58.55	-52.89	-73.96	-68.95	-87.57	-87.73	-70.94	-87.52	-58.85	-87.69	-87.71	-58.22	-79.39	-87.56	-52.29	-60.18	-63.25	-63.30	-87.25	-87.56	-87.52	-87.55	-87.50	-87.48	-87.55	-87.55	-87.52	-87.56	-60.36	-87.50	-87.53	-61.87	-87.47	-87.48	-61.33	-63.40	-66.45
Punto Nodal 5	-87.66	-72.04	-65.90	-81.64	-87.44	-70.32	-67.12	-85.88	-69.61	-87.79	-61.43	-78.77	-66.11	-68.81	-84.52	-72.11	-87.15	-87.73	-86.96	-87.67	-69.70	-87.76	-87.37	-64.02	-82.85	-87.55	-64.04	-69.02	-75.74	-81.03	-87.16	-87.55	-87.60	-87.60	-87.55	-87.56	-87.60	-87.60	-87.57	-87.58	-66.32	-86.54	-87.58	-65.06	-87.54	-87.53	-71.87	-68.91	-72.06
Punto Nodal 6	-87.72	-78.37	-69.01	-85.70	-87.73	-71.89	-76.26	-87.50	-74.56	-87.67	-68.99	-86.14	-73.06	-74.61	-84.04	-74.58	-87.59	-87.86	-85.24	-87.71	-73.13	-87.78	-87.72	-76.07	-87.31	-87.48	-78.37	-71.80	-87.67	-86.77	-86.08	-87.55	-87.56	-87.60	-87.57	-87.61	-87.64	-87.61	-87.41	-87.62	-79.53	-87.50	-87.50	-77.52	-87.54	-87.41	-78.66	-80.18	-83.77
Punto Nodal 7	-88.09	-68.27	-68.79	-83.43	-88.01	-69.16	-67.78	-86.05	-71.98	-87.98	-67.76	-81.11	-73.05	-70.23	-83.82	-77.40	-87.81	-87.89	-85.76	-87.59	-68.76	-87.85	-87.68	-69.57	-83.20	-87.74	-66.02	-71.27	-87.58	-81.66	-87.62	-87.65	-87.67	-87.67	-87.58	-87.59	-87.67	-87.67	-87.58	-87.64	-67.89	-87.50	-87.63	-72.40	-87.63	-87.59	-72.95	-73.57	-72.94
Punto Nodal 8	-87.64	-75.31	-71.58	-86.27	-87.46	-71.89	-69.97	-86.88	-71.95	-86.94	-66.74	-79.12	-67.96	-71.89	-86.11	-73.44	-87.51	-87.77	-87.16	-87.69	-68.76	-87.73	-87.28	-69.15	-86.71	-86.67	-69.81	-74.03	-80.15	-81.54	-87.44	-87.48	-87.54	-87.53	-87.26	-87.38	-87.49	-87.30	-87.27	-87.35	-70.53	-87.03	-87.42	-77.15	-87.44	-87.45	-72.81	-74.00	-76.19

Canal libre (TVWS)
Canal ocupado

Tabla 7. Potencia (dBm) y análisis de los canales libres y ocupados en la banda TDT de cada uno de los puntos nodales

5.2 Estructura de datos del REM

Cada uno de los puntos que forman parte del REM sigue una misma estructura determinada. Para estructurar los datos se ha definido en Matlab una clase tipo POINT donde se almacena información del punto. La clase POINT contiene los siguientes campos:

- **pointType (<1x1>):** NODAL o *KRIGING*. NODAL en el caso que sea un punto nodal y *KRIGING* si es un punto estimado a partir de los puntos nodales y el algoritmo de interpolación *Kriging*.

- **Latitude (<1x1>):** Latitud en coordenadas decimales del punto.

- **Longitude (<1x1>):** Longitud en coordenadas decimales del punto.

- **Values (<49x5>):** Matriz en la que aparece para cada uno de los canales, el número, la frecuencia, la potencia recibida, el umbral de decisión y una última columna con unos o ceros para mostrar la existencia de TVWS. Un "1" para TVWS y un "0" para canal ocupado.

Además, cada uno de estos puntos se guarda en un archivo tipo POINT con la siguiente estructura: **pointType_Latitud_Longitud.mat**

En la Tabla 8 se puede ver un ejemplo de la estructura que siguen los puntos. En este caso el punto nodal Badalona 1.

NODAL_41.4664_2.2505.mat	
PointType: NODAL	
Latitude: 41.4664	Longitude: 2.2505
Values:	

Número canal	Frecuencia (MHz)	Potencia (dBm)	Umbral (dBm)	TVWS
21	474	-87.76	-86.62	1
22	482	-63.25	-86.68	0
23	490	-53.86	-86.67	0
24	498	-74.77	-86.61	0
25	506	-87.73	-86.63	1
26	514	-57.99	-86.69	0

27	522	-61.05	-86.59	0
28	530	-83.85	-86.62	0
29	538	-59.47	-86.49	0
30	546	-87.65	-86.59	1
31	554	-66.36	-86.48	0
32	562	-76.55	-86.55	0
33	570	-54.89	-86.72	0
34	578	-60.21	-86.50	0
35	586	-75.04	-86.57	0
36	594	-66.64	-86.46	0
37	602	-87.68	-86.50	1
38	610	-87.76	-86.48	1
39	618	-86.5	-86.30	1
40	626	-87.64	-86.37	1
41	634	-67.55	-86.47	0
42	642	-87.69	-86.46	1
43	650	-87.65	-86.46	1
44	658	-59.79	-86.44	0
45	666	-79.83	-86.32	0
46	674	-87.59	-86.33	1
47	682	-61.94	-86.41	0
48	690	-69.09	-86.36	0
49	698	-70.77	-86.45	0
50	706	-73.91	-86.37	0
51	714	-87.51	-86.34	1
52	722	-87.55	-86.45	1
53	730	-87.53	-86.34	1
54	738	-87.55	-86.25	1
55	746	-87.46	-86.33	1
56	754	-87.47	-86.34	1
57	762	-87.53	-86.32	1
58	770	-87.51	-86.30	1
59	778	-87.41	-86.25	1
60	786	-87.52	-86.32	1
61	794	-55.43	-86.33	0
62	802	-86.98	-86.39	1
63	810	-87.52	-86.37	1
64	818	-59.25	-86.29	0
65	826	-87.09	-86.28	1
66	834	-87.39	-86.33	1
67	842	-67.45	-86.22	0
68	850	-68.08	-86.27	0
69	858	-65.03	-86.13	0

Tabla 8. Ejemplo de estructura de datos del REM para el punto nodal Badalona 1

5.3 Procesado para la construcción del REM

A continuación se detalla el procesado de datos que se ha llevado a cabo para la construcción del REM de TVWS, tanto para los puntos nodales como para los puntos procedentes de la interpolación, denominados en este apartado como puntos *Kriging*. El procesado parte desde los datos procedentes del analizador de espectros hasta obtener los puntos con el formato anteriormente explicado para la construcción del REM.

5.3.1 Consideraciones previas

El procesado de puntos y la implementación del algoritmo de interpolación (A.I) parte del trabajo realizar por el proyectista Marc Darné, quien que se encargó de implementar el A.I *Kriging*.

Una de las principales diferencias a la hora de procesar los puntos y construir el REM es que Marc Darné utilizó el analizador de espectros *R&S FSL6 Spectrum Analyser* en vez del utilizado en este proyecto, el *Anritsu Handheld Spectrum Anlyzer MS2721B*. Esto provoca que el formato de las medidas que se obtienen del analizador cambie y se tenga que adecuar el procesado de puntos a estas medidas.

Otra de las diferencias es el entorno a estudiar. En el caso de Marc se realizó el algoritmo pensando en entornos reducidos comparado con el Área Metropolitana de Barcelona. En este caso el radio de curvatura de la Tierra prácticamente no es apreciable. Pero si tenemos en cuenta la región de Badalona y alrededores sí que afecta el radio de curvatura y por lo tanto es necesario utilizar la proyección UTM (apartado 3.3.2) para calcular las distancias entre puntos.

Estas son las grandes diferencias que se presentaron a la hora de realizar el procesado y la interpolación de los puntos para la construcción del REM.

5.3.2 Punto NODAL

Antes de empezar con la interpolación, el primer paso es convertir las medidas de los puntos nodales obtenidas con el analizador de espectros al formato deseado. A grandes rasgos el procedimiento que se lleva a cabo para procesar cada uno de los puntos es el que se presenta en el siguiente diagrama (Figura 47).

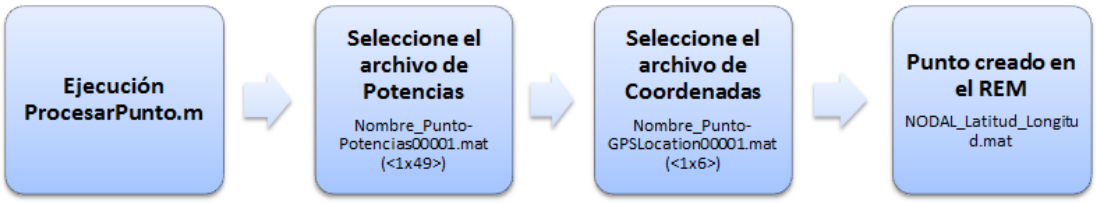


Figura 47. Procedimiento del procesado de los puntos nodales

Una vez ejecutado el *script* ProcesarPunto.m, se abre una ventana en la cual se selecciona el archivo de potencias del punto a procesar procedente del analizador de espectros. Una vez elegido el archivo de potencias se repite el proceso para el archivo de coordenadas. Finalmente, al terminar el proceso aparece el punto en el directorio actual y con el nombre de **NODAL_Latitud_Longitud.mat (<1x1 POINT>)** como se puede apreciar en el ejemplo de la Figura 48.

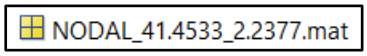


Figura 48. Ejemplo de punto Nodal 3 una vez procesado

El *script* ProcesarPunto.m además de tener como *input* el archivo de potencias y el de coordenadas de los puntos nodales, también requiere el umbral de decisión para decidir sobre la existencia de TVWS (Figura 49).

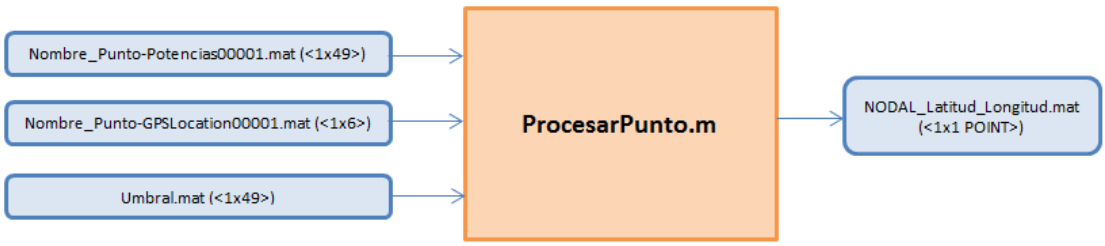


Figura 49. *Inputs* y *output* de la función ProcesarPunto.m

Antes de ejecutar el *script* ProcesaPunto.m se debe haber obtenido el umbral de decisión con una probabilidad de falsa alarma del 1%. La función encargada del cálculo del umbral es Umbral_PFA.m (Figura 50). Requiere el archivo de amplitudes y el de frecuencias de la medida realizada con la carga adaptada de 50 Ω y la probabilidad de falsa alarma como parámetro de

entrada, en este caso 1%. Una vez obtenido el umbral de decisión ya no se deberá volver a ejecutar esta función ya que todos los puntos tienen el mismo umbral.

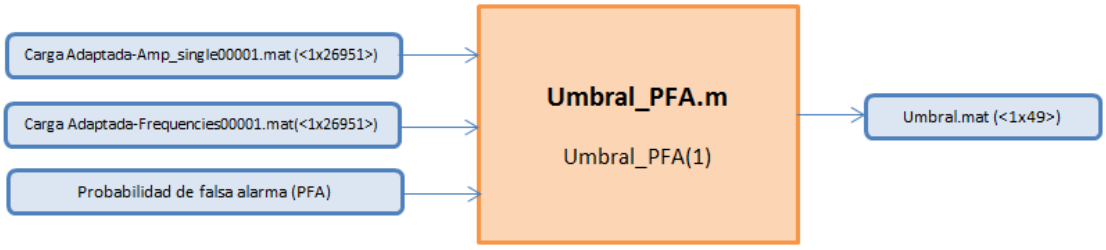


Figura 50. *Inputs* y *output* de la función Umbral_PFA.m

Internamente el *script* ProcesaPunto.m compara la potencia de cada uno de los canales con el umbral de decisión para decidir sobre la existencia de TVWS en cada uno de los 49 canales. Esto se realiza mediante la función TVWS.m (Figura 51).

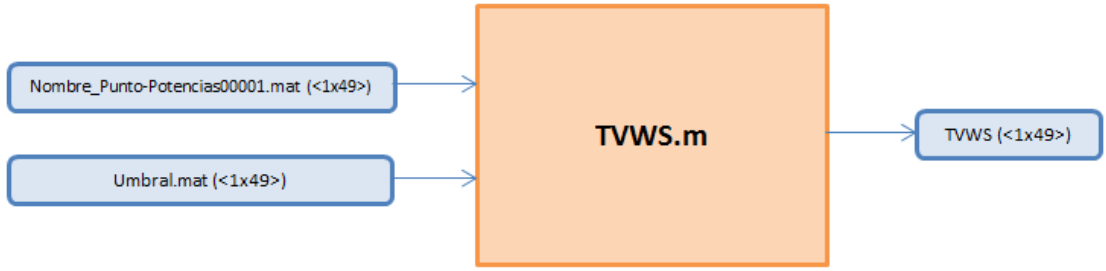


Figura 51. *Inputs* y *output* de la función TVWS.m

Este procedimiento se realiza para cada uno de los puntos medidos a través del analizador de espectros. Una vez terminado, ya se tiene listo el REM con el formato adecuado para la obtención de los puntos *Kriging* por medio de la interpolación.

5.3.3 Punto *KRIGING*

Una vez tenemos procesados todos los puntos nodales, el siguiente paso es implementar un A.I que nos permita estimar nuevos puntos a partir de estos puntos nodales. En este caso, el A.I *Kriging*.

A nivel de usuario el diagrama que sigue el A.I *Kriging* es el que aparece en la Figura 52. En este diagrama aparece la interacción que debe realizar un usuario para obtener la estimación de un punto determinado.

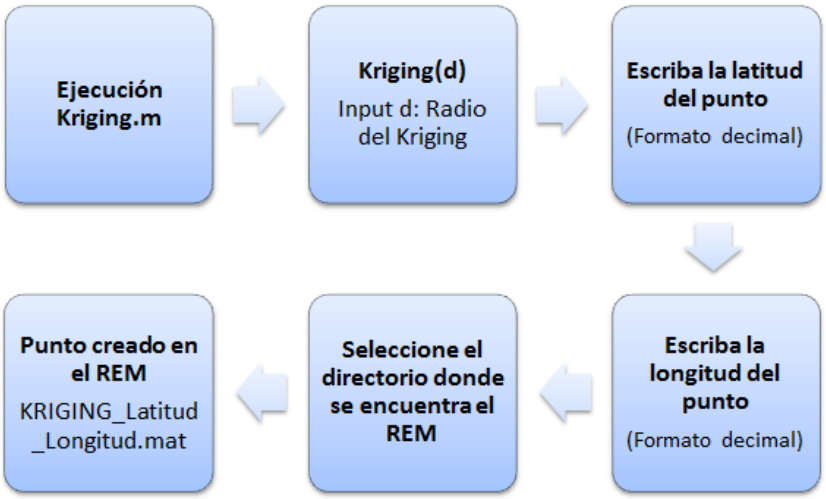


Figura 52. Procedimiento a nivel de usuario del A.I *Kriging* para la obtención de los puntos *Kriging*

La función *Kriging*.m es la encargada de realizar la interpolación. Tiene como parámetro de entrada el radio del A.I *Kriging*, es decir, la distancia máxima del punto a estimar a los puntos nodales a partir de la cual no se tienen en cuenta los puntos nodales a la hora de llevar a cabo la interpolación. Cualquier punto nodal que esté a una distancia igual o superior a la a la distancia "d" se excluye para estimar el punto *Kriging*. Una vez ejecutada la función con el radio deseado, el siguiente paso es especificar las coordenadas en formato decimal del punto a estimar, primero se le pide al usuario que escriba la latitud y a continuación la longitud. A continuación se debe detallar el directorio donde se encuentran los puntos nodales procesados y posteriormente se inicia la computación del algoritmo. Finalmente, se guardan los resultados del punto estimado con la estructura de ***KRIGING*_Latitud_Longitud.mat** que se ha detallado anteriormente (Figura 53).

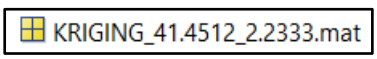


Figura 53. Ejemplo punto *Kriging* una vez finalizado el A.I

Una vez explicado cómo se realiza la interpolación a nivel de usuario, se procede a explicar más detalladamente los pasos que realiza internamente la función *Kriging*.m para implementar el A.I *Kriging* (Figura 55) y sus *inputs* y *output* (Figura 54).

Ejecutada la función con el radio del A.I *Kriging* y especificado la latitud y la longitud del punto a estimar, el siguiente paso es comprobar que ese punto se encuentra dentro de los límites inicialmente diseñados. Se realiza comprobando si el punto se encuentra dentro del polígono que forman las 4 coordenadas de la matriz REMlimites.mat. Si eso se cumple, se procede, como se ha comentado anteriormente, a que el usuario especifique el directorio donde se ubica el REM. Una vez que el algoritmo conoce la ubicación del REM empieza a buscar los puntos nodales que se encuentran en él. Para realizar la búsqueda, hace un rastreo de todos los archivos que empiecen por "NODAL", y cuando se obtiene cada uno de los puntos, se leen sus coordenadas y se convierten a coordenadas UTM para conocer la distancia real de cada uno de los puntos nodales con el punto a estimar. Los puntos que estén a una distancia igual o mayor que el radio especificado por el parámetro de entrada "d" en la función no se tiene en cuenta a la hora de realizar la estimación. Para poder seguir con el algoritmo al menos ha de haber 2 puntos nodales para realizar la interpolación. Si se encuentran 2 o más puntos nodales dentro del radio, se calcula la matriz de covarianzas (C), el vector de covarianzas (c) y el vector lambda (λ), explicados en el apartado 3.2.3.1 del proyecto y necesarios para calcular los valores de la estimación, en este caso la potencia por canal.

Conocida la potencia por canal del punto *Kriging*, se procede a comparar el umbral calculado anteriormente con la potencia por canal y se dilucidan los hipotéticos TVWS. Por último, se guarda el archivo del punto estimado en el directorio donde se encuentra el REM con el formato especificado para los puntos *Kriging*.

Figura 54. *Inputs* y *output* de la función *Kriging*.m

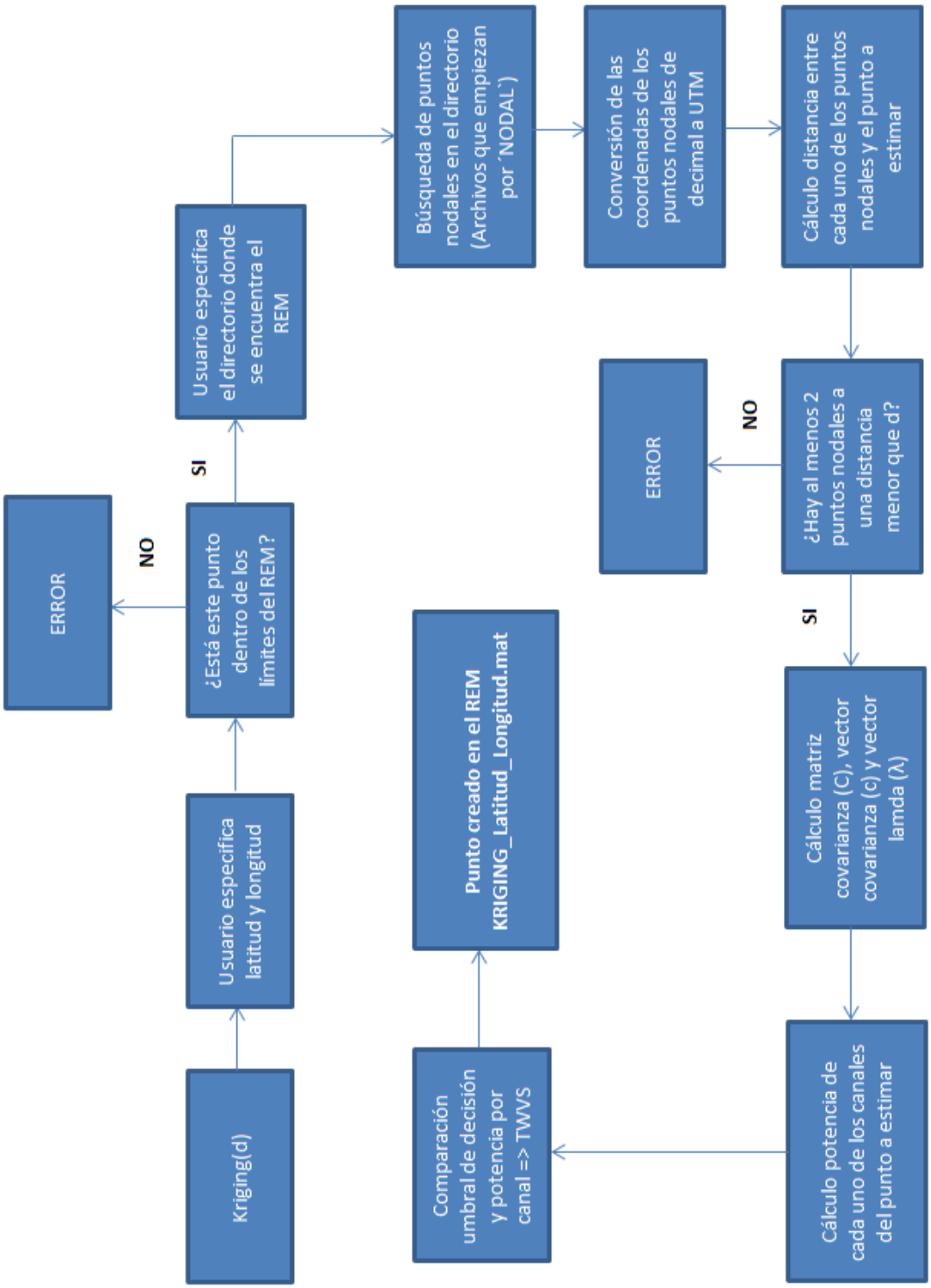


Figura 55. Procedimiento llevado a cabo en Kriging.m para implementar el A.I Kriging

6. Validación del REM de TV *White Spaces* y análisis de los resultados

Una vez procesado los datos y construido el REM, el siguiente paso es validar el REM implementado a partir del A.I *Kriging*. Primero de todo se realiza un estudio para determinar qué radio del A.I *Kriging* presenta unos mejores resultados. Según el radio que se elija, el A.I abarca más o menos puntos nodales para realizar el procesado. Con el radio elegido como óptimo, se muestra el error absoluto por canal de cada uno de los puntos de validación. A continuación, se valoran los resultados en comparación con otro A.I conocido mucho más fácil de implementar, *Nearest Neighbor*. Esta comparación se realiza tanto en términos de error como de detección de TVWS. Todos estos análisis se realizan en los tres puntos de validación para poder apreciar qué efecto tiene el terreno en el error y en la detección de TVWS. Por último, se observan las posibles similitudes en el comportamiento del A.I *Kriging* con el A.I IDW para el radio elegido.

6.1 Error en la estimación del A.I *Kriging*

En este apartado se realiza un estudio del error que ofrece el A.I *Kriging* entre el punto estimado y el punto de validación medido. A raíz de este estudio se decide cuál es el radio del A.I *Kriging* más apropiado para llevarlo a cabo en el entorno en cuestión. Una vez elegido el radio, se analiza el error absoluto por canal en todo el espectro televisivo. Por último, se procede a hacer lo mismo pero centrándose en esos canales susceptibles de llegar a ser un TVWS.

6.1.1 Impacto del radio del A.I *Kriging*

Se consideran tres radios: 0.75 Km, 1 Km y 2 Km. La razón por la cual se eligen estos radios es porque permiten ver de forma gradual como varía el error en función de la distancia. La elección de 0.75 Km como radio inicial se debe a que por debajo de este radio es difícil encontrar algún punto nodal para realizar el A.I *Kriging* en el escenario en cuestión. Los resultados que se presentan están basados en el esquema diseñado para una resolución de 1

Km entre puntos nodales (apartado 4.3.1). Por ejemplo, en la Figura 56 se puede observar los tres radios que se tienen en cuenta y los puntos que abarca cada uno para el punto Validación 1.

Figura 56. Radios del A.I *Kriging* analizados y los puntos nodales que albergan en su interior para el punto Validación 1

Para apreciar el comportamiento del A.I *Kriging* se calcula para los tres radios y para los tres puntos de validación la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (6-1). Donde P_n es el valor de potencia de cada uno de los canales, del 21 al 69 para un total de 49, y $\hat{P}_n$ es el valor estimado de cada uno de ellos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{49}\sum_{n=21}^{69}(P_n - \hat{P}_n)^2} \qquad (6\text{-}1)$$

Para la estimación del punto Validación 1, se observa (Figura 57) que a medida que aumentamos el radio, el RMSE aumenta. Es decir, que para el análisis del espectro televisivo y para la resolución en la que estamos trabajando es mejor coger menos puntos para realizar el A.I. Esto se produce debido a que los puntos que están a más alejados no están correlados con los puntos próximos y distorsionan el promedio. En el caso de un radio de 0.75 Km intervienen tres puntos nodales para la realización de la estimación del punto Validación 1 (Figura 57).

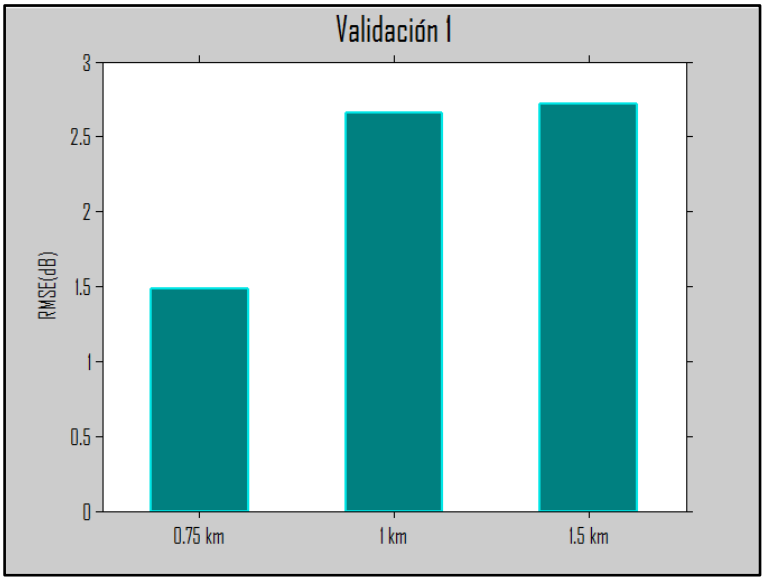


Figura 57. RMSE para los diferentes radios del *Kriging* en el punto Validación 1

La estimación del punto Validación 2 tiene un comportamiento parecido al caso anterior (Figura 58). Esto es debido a que ambos puntos estimados se encuentran en un entorno urbano.

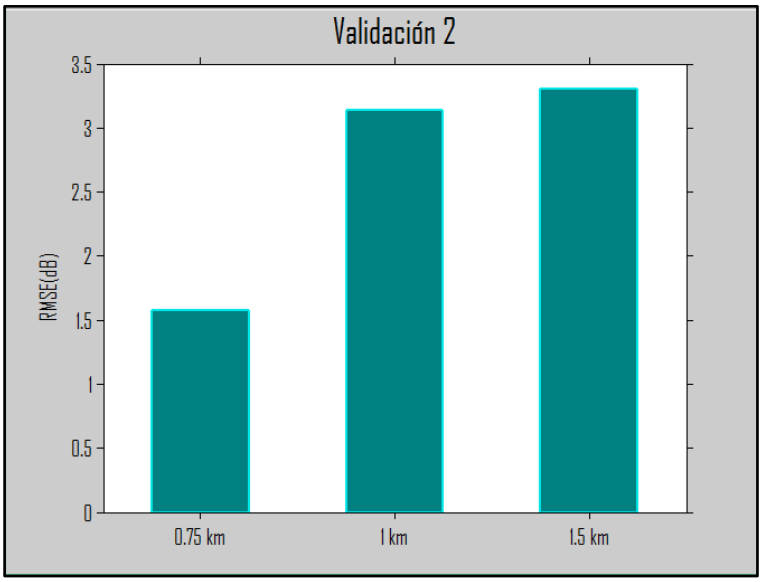


Figura 58. RMSE para los diferentes radios del A.I *Kriging* en el punto Validación 2

En el último caso se aprecia que en todos los radios elegidos hay poca variación en términos de RMSE (Figura 59). Además, el error es considerablemente más alto en comparación con los casos anteriores. Esto se debe a que este tercer punto de validación se encuentra en un entorno irregular y montañoso. Esto hace que uno de los puntos nodales tenga muy buena

visibilidad a la Torre de Collserola, haciendo que se perciba un cambio más destacable entre los puntos en términos de potencia.

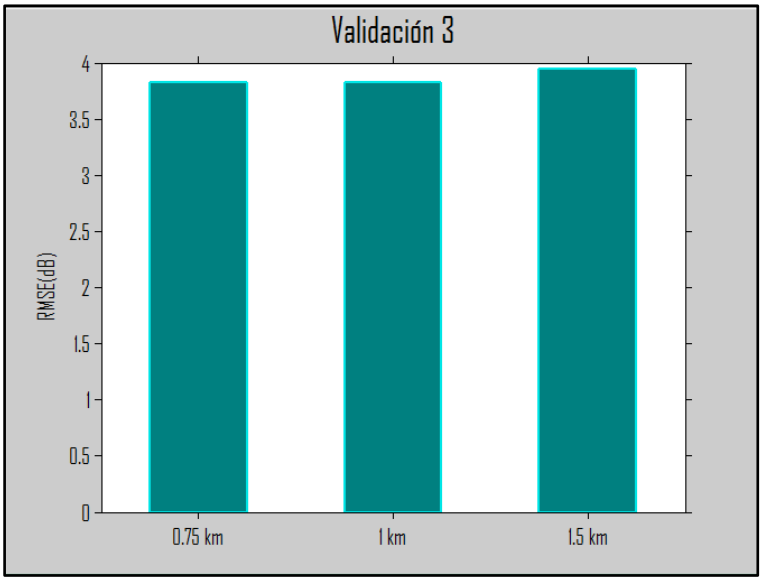


Figura 59. RMSE para los diferentes radios del A.I *Kriging* en el punto Validación 3

Para corroborar esta afirmación se realiza la estimación de nuevo pero excluyendo el punto en cuestión (Figura 60). Como se puede apreciar ahora sí que existe una similitud más destacable con los puntos analizados en un entorno urbano.

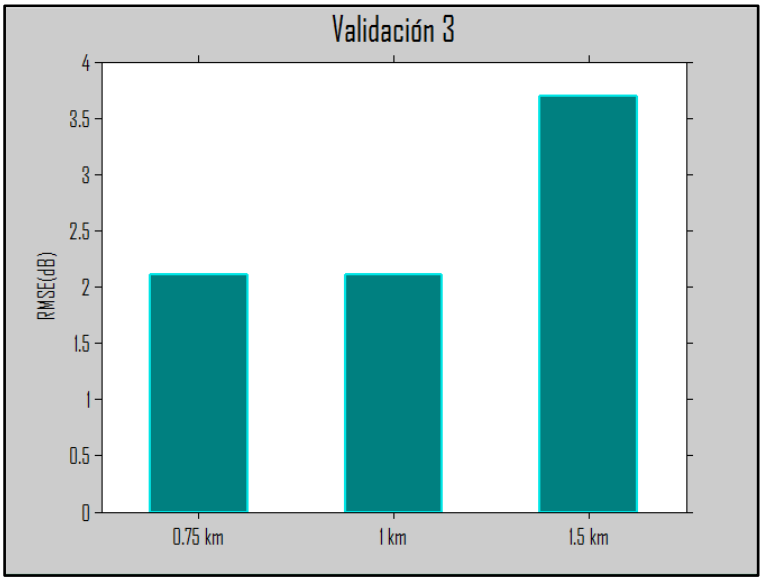


Figura 60. RMSE para los diferentes radios del A.I *Kriging* en el punto Validación 3 excluyendo el punto con buena visibilidad

A partir de los datos obtenidos se considera que el radio más apropiado para realizar el A.I *Kriging* en base a una resolución de 1 Km es de 0.75 Km. De aquí en adelante se toma este valor de radio para los posteriores análisis.

6.1.2 Error absoluto por canal

A continuación se muestra el error absoluto (EA) (6-2) que se presenta en cada uno de los canales para los diferentes puntos estimados en comparación con los puntos de validación medidos.

$$EA = P_n - \hat{P}_n \tag{6-2}$$

Para el punto Validación 1 (Figura 61) hay una gran variación entre el error absoluto de los diferentes canales. Esto sucede en los canales en los que actualmente se está emitiendo alguna señal de televisión (apartado 2.2.4), como por ejemplo los canales 26, 34, 47 y 64 donde se encuentran las mayores variaciones.

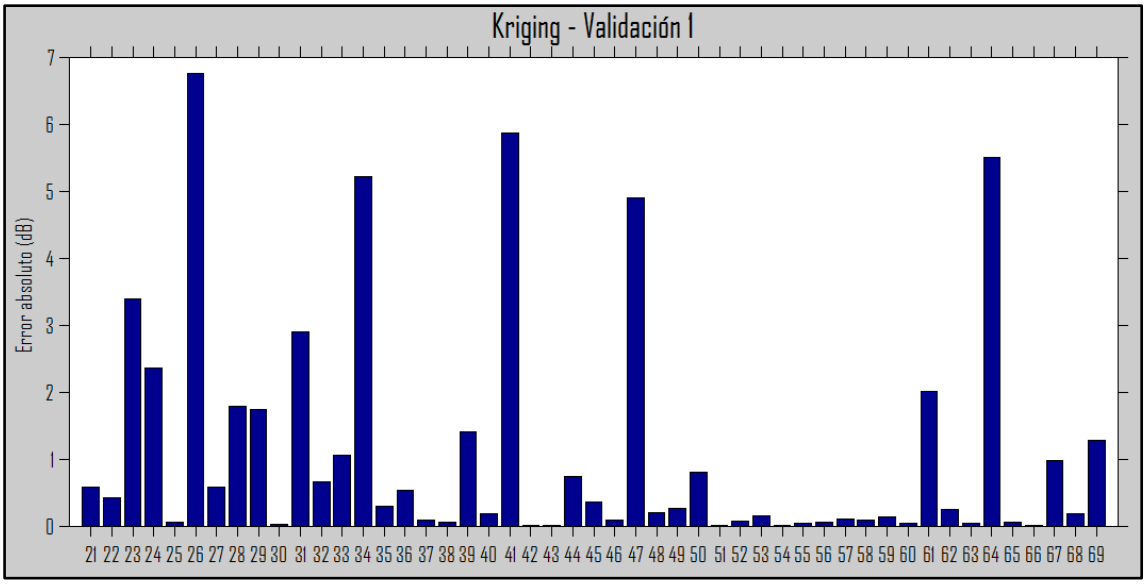


Figura 61. Error absoluto por canal en el punto Validación 1

En el punto de validación 2 ocurre lo mismo (Figura 62). En este caso las mayores variaciones ocurren en los canales 24, 26, 36 y 48. Cabe destacar que ahora aparece el canal 24 como uno de los que presenta un mayor error absoluto ya que el canal 24 es el que proviene del múltiple

local de Mataró y este punto de validación se encuentra más próximo a esta ciudad que el anterior.

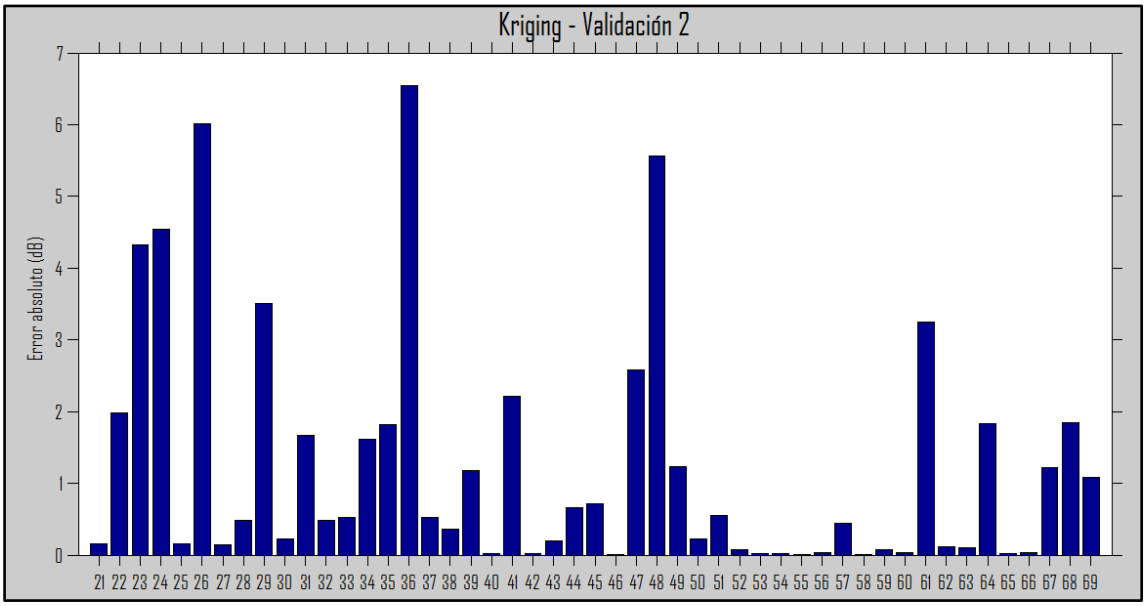


Figura 62. Error absoluto por canal en el punto Validación 2

En el punto Validación 3 (Figura 63) se observa un error absoluto mayor en la estimación de la potencia por canal, ya que como se ha dicho anteriormente al estar realizando el A.I *Kriging* en un entorno irregular puede provocar este tipo de variaciones más bruscas.

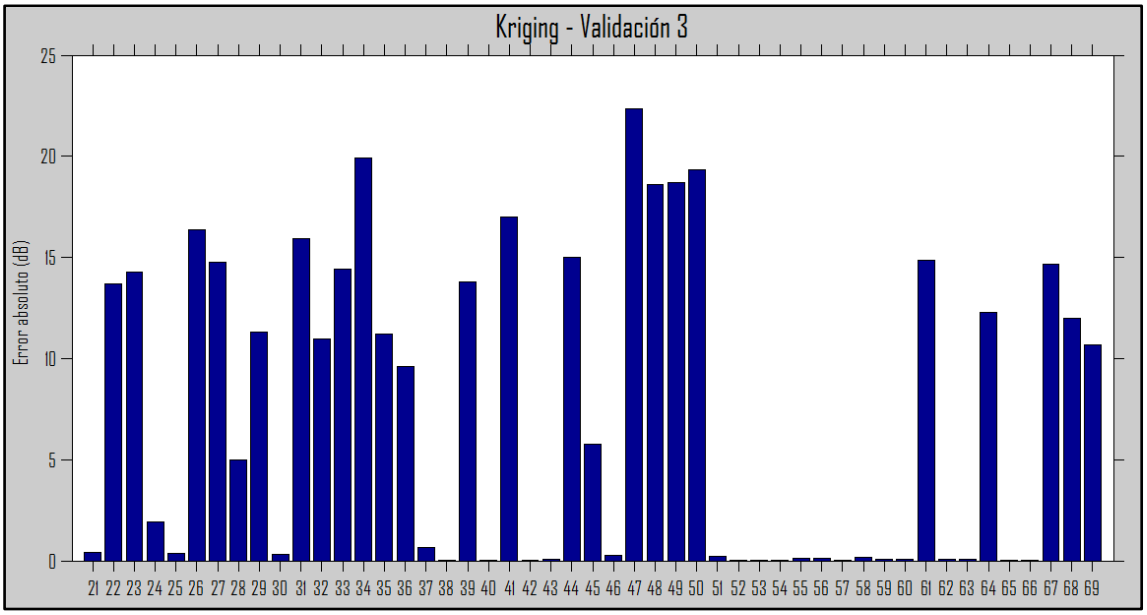


Figura 63. Error absoluto por canal en el punto Validación 3

Se ha realizado el análisis del error absoluto de todos los canales, del 21 al 69. Pero lo que realmente interesa es saber qué variaciones hay en esos canales en los que presuntamente no se emite ninguna señal TDT. Es decir, se han de analizar esos canales que son candidatos a ser TVWS ya que es lo que en nuestro proyecto verdaderamente tiene importancia para dilucidar si el *Kriging* es un buen algoritmo de interpolación.

En la Figura 64 se puede ver lo mismo que en los casos anteriores pero ahora solamente reflejando aquellos canales en los que podría haber un TVWS en el caso del punto Validación 1. Se observa que al tener en cuenta solo aquellos canales que en principio no emiten ningún canal en la zona de estudio el error absoluto disminuye substancialmente.

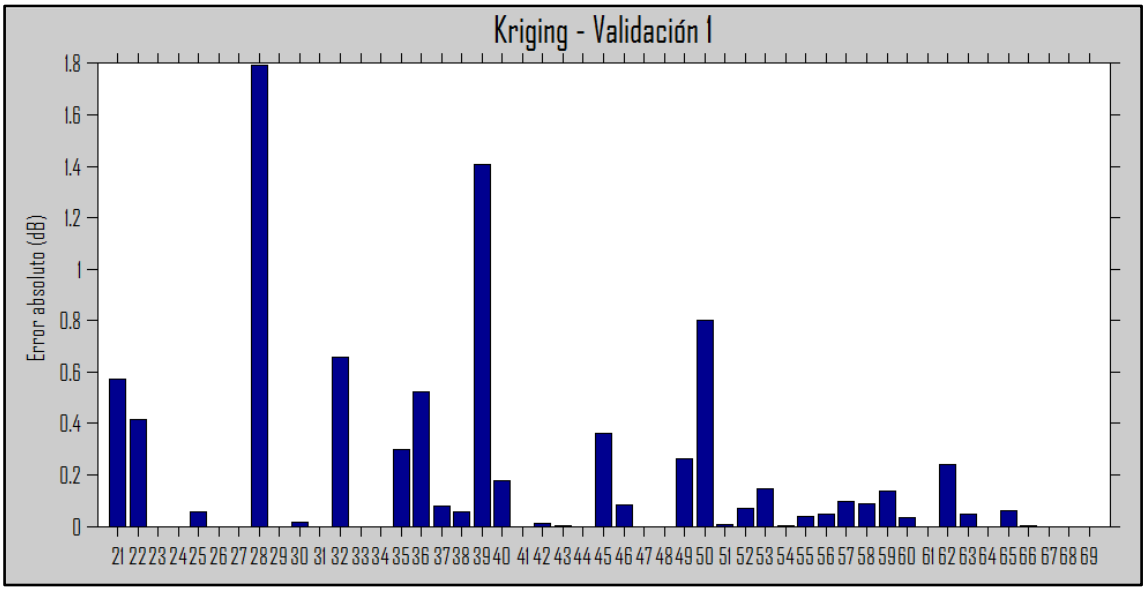


Figura 64. Error absoluto para los canales susceptibles de ser TVWS en el punto Validación 1

6.3 Comparación A.I: *Kriging* y *Nearest Neighbor*

Una vez visto lo que ofrece el A.I *Kriging* en términos de error, el siguiente paso es compararlo con otro algoritmo de interpolación para poder apreciar más detalladamente los resultados que ofrece el mismo. Para comparar el A.I *Kriging* se ha elegido un algoritmo mucho más fácil de implementar como es el A.I *Nearest Neighbor*, el cual permite a simple vista hacerse una idea de las posibilidades que brinda el A.I *Kriging*. Este algoritmo de interpolación, a partir de ahora llamado A.I *Nearest* para simplificar la notación, basa su estimación únicamente en el punto nodal que se encuentra más próximo. La comparación se realiza tanto en términos de RMSE como de la decisión de TVWS.

6.3.1 Según RMSE

A continuación se muestra el RMSE de los puntos estimados realizados tanto con el A.I *Kriging* como con el A.I *Nearest*. Además, se comparan los resultados de cuando se utilizaba una resolución de 2 Km entre puntos y los resultados una vez ampliado los puntos a una resolución de 1 Km.

En la Figura 65 se puede apreciar una mejora substancial al bajar de una resolución de 2 km a una de 1 km tanto en la estimación realizada con el A.I *Kriging* como la realizada con el A.I *Nearest*. Una vez visto que una resolución de 1 Km entre puntos ofrece mejores resultados se procede a realizar la comparación entre los dos algoritmos de interpolación observando resultados similares en ambos casos.

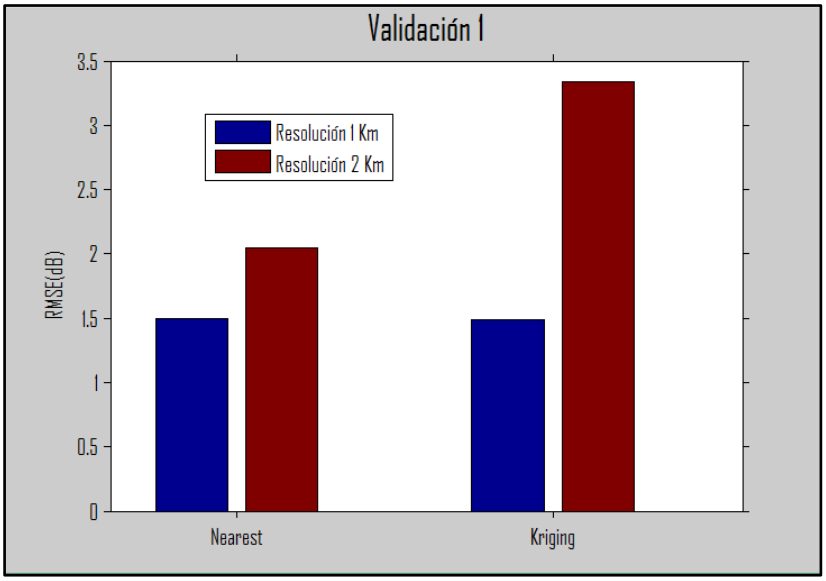


Figura 65. RMSE para los A.I *Nearest* y *Kriging* y para resoluciones de 1 Km y 2 Km en el punto Validación 1

En el punto Validación 2 (Figura 66) se obtienen resultados parecidos al caso anterior ya que como se ha dicho antes, la estimación también se realiza en un entorno urbano.

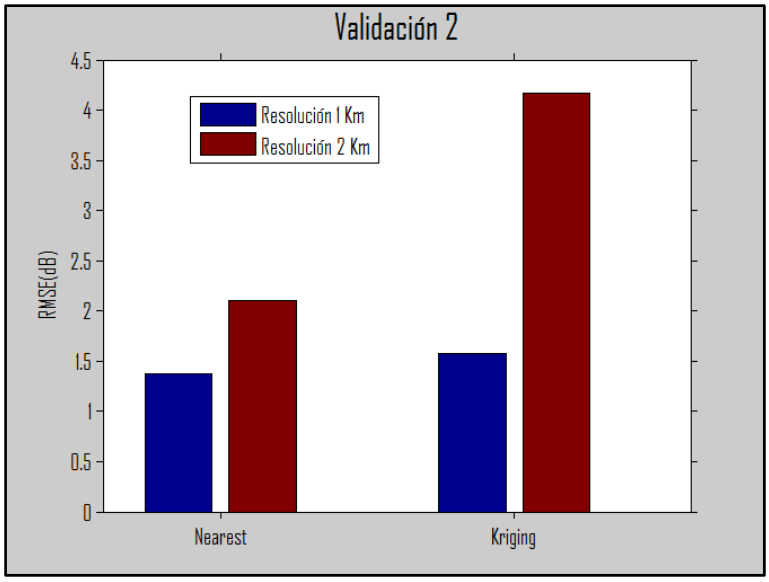


Figura 66. RMSE para los A.I *Nearest* y *Kriging* y para resoluciones de 1 Km y 2 Km en el punto Validación 2

En este último caso (Figura 67) se observan resultados diferentes a los esperados. No se aprecia una mejora muy apreciable al reducir la resolución pero si al comparar ambos A.I. Esto se debe a que el A.I *Nearest* coge solamente un punto y en ése se basan todos sus cálculos. En cambio en el A.I *Kriging* entran más puntos nodales en la ecuación. En este caso para crear el punto estimado el A.I *Nearest* coge como referencia el punto nodal que tiene visibilidad directa a la Torre de Collserola, lo que nos hace perder fiabilidad a la hora de la estimación.

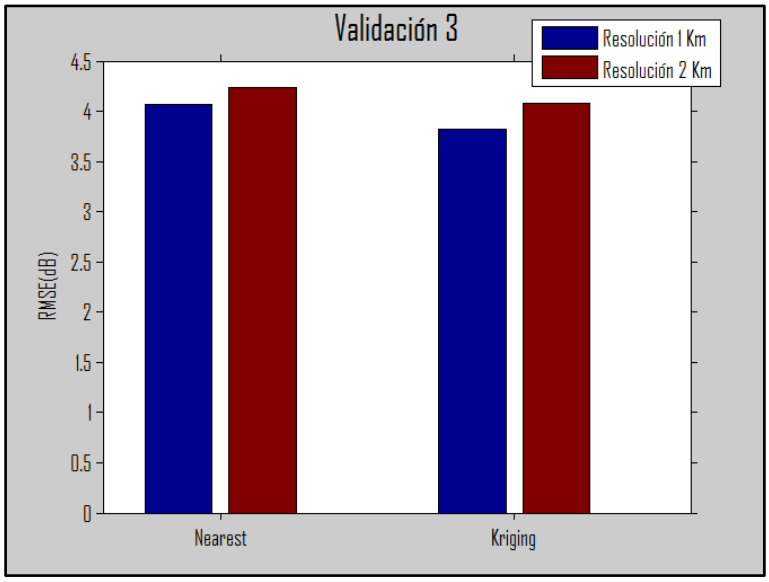


Figura 67. RMSE para los A.I *Nearest* y *Kriging* y para resoluciones de 1 Km y 2 Km en el punto Validación 3

A simple vista puede parecer que ambos A.I ofrecen resultados similares pero en el siguiente apartado se ve que el A.I *Kriging* nos aporta otras virtudes en relación a lo que el proyecto aspira a conseguir, decidir si un canal es un TVWS o no.

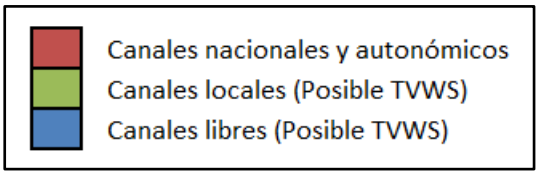
6.3.2 Según detección TVWS

En este apartado se observa como son los diferentes A.I capaces de estimar la existencia de un TVWS. La comparación se realiza en base al punto de validación medido en cada una de las tres zonas de estudio.

Antes de analizar la estimación en función de la detección de TVWS, se realiza un estudio para determinar sobre el papel qué canales están ocupados oficialmente, qué canales podrían llegar a ser un TVWS y en qué canales teóricamente no se emite ninguna señal de televisión en la región de Badalona y alrededores (Tabla 9). En el primer grupo se encuentran los canales estatales y autonómicos, en el segundo grupo los canales locales y en el tercer grupo los canales libres.

Canales	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
TVWS teóricos	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO

Tabla 9. Estudio teórico de los canales libres y ocupados



En este estudio teórico se consideran todos los canales nacionales y autonómicos ocupados. Además, al estar trabajando en la región de Badalona y alrededores también se considera como ocupado los canales 26 y 48 procedentes del múltiple local de Barcelona y el canal 24 procedente del múltiple local de Mataró.

Cómo se puede observar, en este estudio teórico se aprecian un total de 28 TVWS en la banda espectral dedicada actualmente a la televisión (470-790 MHz), es decir, del canal 21 al canal. 60. Esto significa que hay una gran parte del espectro sin utilizar, lo que permitiría una gran oportunidad para el uso de las *Cognitive Radio*.

Una vez vistos los resultados teóricos se observan los resultados reales a partir de los puntos de validación medidos en las tres zonas estudiadas para poder observar si realmente existen estos huecos espectrales observados en el estudio teórico (Tabla 10).

Canales	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
TVWS teóricos	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO
TVWS Punto validación 1	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO
TVWS Punto validación 2	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO
TVWS Punto validación 3	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO

Tabla 10. TVWS teóricos y TVWS reales de los puntos de validación medidos

Finalmente, en los puntos medidos se han llegado a contabilizar entre 22 y 26 TVWS, dependiendo del punto medido en la región de Badalona y alrededores, de los 28 TVWS que se habían previsto en el estudio teórico. Algunos de los canales locales finalmente se encuentran ocupados, ya que aunque sea pequeña, se recibe potencia de estos múltiples locales. Como por ejemplo el canal 50, procedente del múltiple local de Vic y que se considera como ocupado en los puntos de validaciones 1 y 3 medidos en la región de Badalona. En cambio otros teóricamente están libren pero aparecen como ocupados en las medidas A continuación se destacan los canales que teóricamente deberían estar libres pero que realmente se encuentran ocupados:

- Canal 22: Este canal aparece ocupado en los tres puntos medidos para la validación (Figura 68). Según [42] Abertis utiliza la emisión del canal 22 desde la Torre de Collserola para realizar pruebas de Ultra Alta definición.

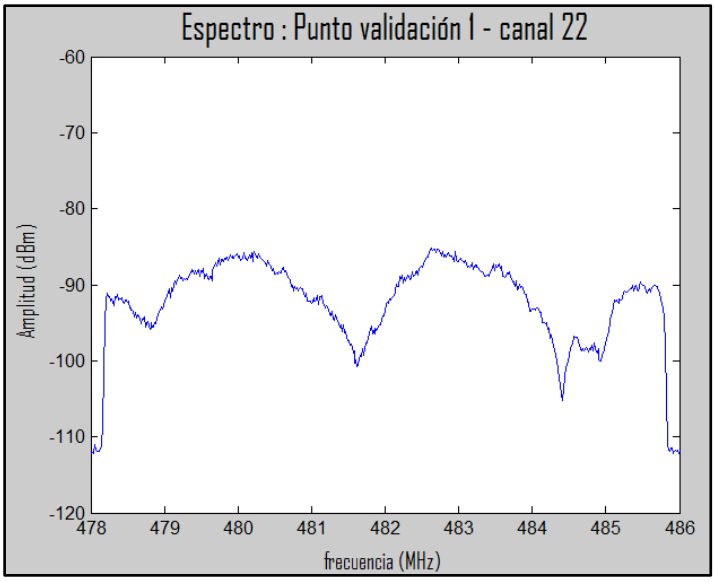


Figura 68. Espectro canal 22 punto Validación 1

- **Canal 35:** Este canal aparece ocupado en el punto de validación 1. Según [43] por este canal antiguamente emitía el canal local de Vic antes de pasar a emitirse por el canal 50 como lo hace actualmente. Se puede llegar a la conclusión que se sigue emitiendo por ambos canales ya que como se puede observar en la Figura 69 se está emitiendo una señal TDT en ese canal aunque la potencia sea muy baja.

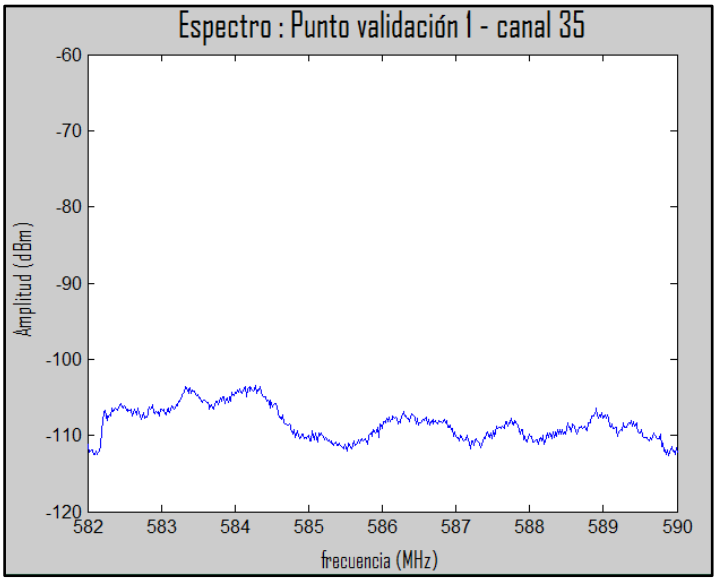


Figura 69. Espectro canal 35 punto Validación 1

- **Canal 36:** Este canal aparece ocupado en los tres puntos medidos para la validación. Según [43] por este canal antiguamente emitía el múltiple local de Cornellà de Llobregat antes de

pasar a emitirse por el canal 50 como lo hace actualmente. Se puede llegar a la conclusión que se sigue emitiendo por ambos canales ya que se está emitiendo una señal TDT en ese canal (Figura 70).

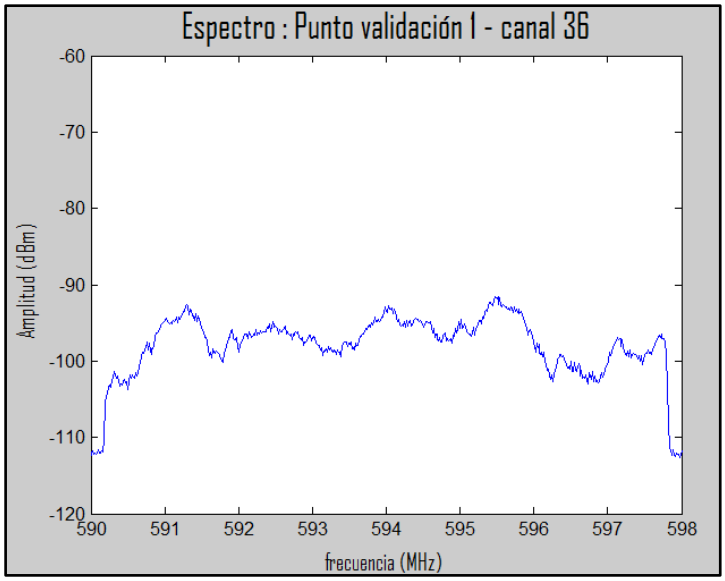


Figura 70. Espectro canal 36 punto Validación 1

A continuación se muestra la detección de TVWS en las tres zonas de validación con los puntos estimados por los diferentes métodos de interpolación para poder determinar si son fiables o no a la hora de la detección de TVWS. También aparece la detección de TVWS del punto de validación medido para ver cómo se comporta en el caso real y poder compararlo con la detección de TVWS de los A.I.

Al comparar la detección de TVWS con los tres métodos en el punto Validación 1 (Figura 71), se observa que se detectan los mismos TVWS excepto en los canales 28 y 39 que según los A.I *Kriging* y *Nearest* no se consideran como tal.

Aunque a priori se podría pensar que los algoritmos no acaban de estimar correctamente los TVWS en esos canales es totalmente lo contrario. Esto nos permite una mayor robustez a la hora de decidir si ese canal es un TVWS. El problema sería si se diera por TVWS un canal en el que están emitiendo usuarios primarios ya que se podría causar interferencias. Pero en este caso ocurre lo contrario.

En el caso del A.I *Kriging* solamente que uno de los puntos que estén a alrededor detecte una mínima señal en un canal, ese canal ya no puede ser un TVWS. En el caso del A.I *Nearest* se tiene en cuenta únicamente el punto más cercano para esclarecer si ese canal está ocupado o no.

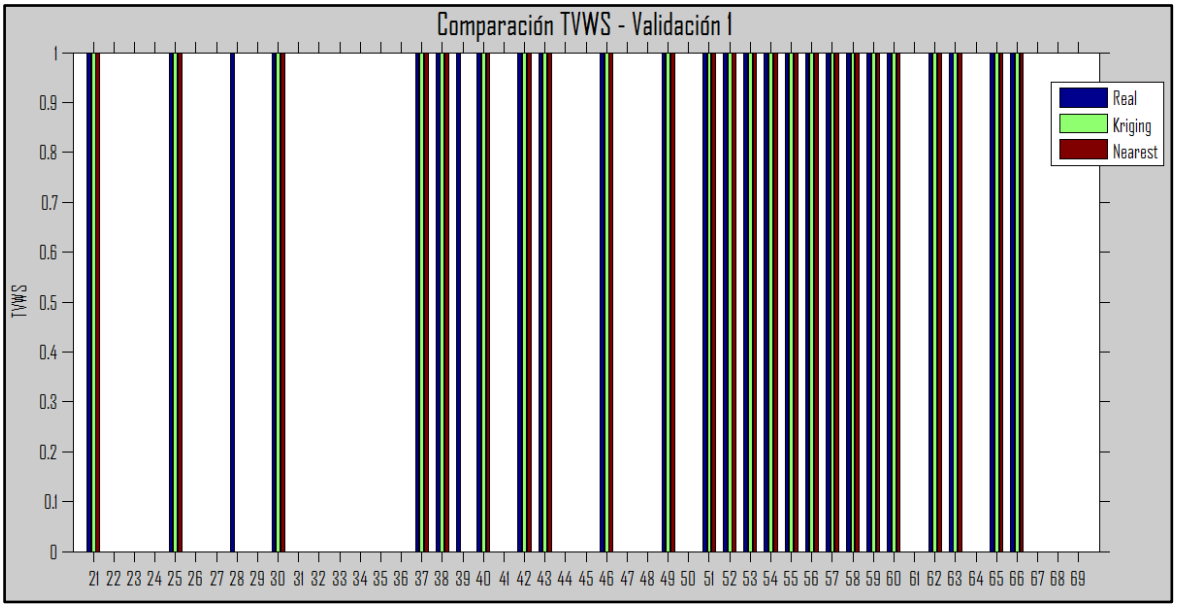


Figura 71. Comparación detección TVWS real y detección TVWS de los A.I *Kriging* y *Nearest* en el punto Validación 1

A continuación se observa la comparación pero en el punto Validación 2 (Figura 72). En este caso se puede ver que se detectan los mismos TVWS excepto en los canales 35, 45 y 49.

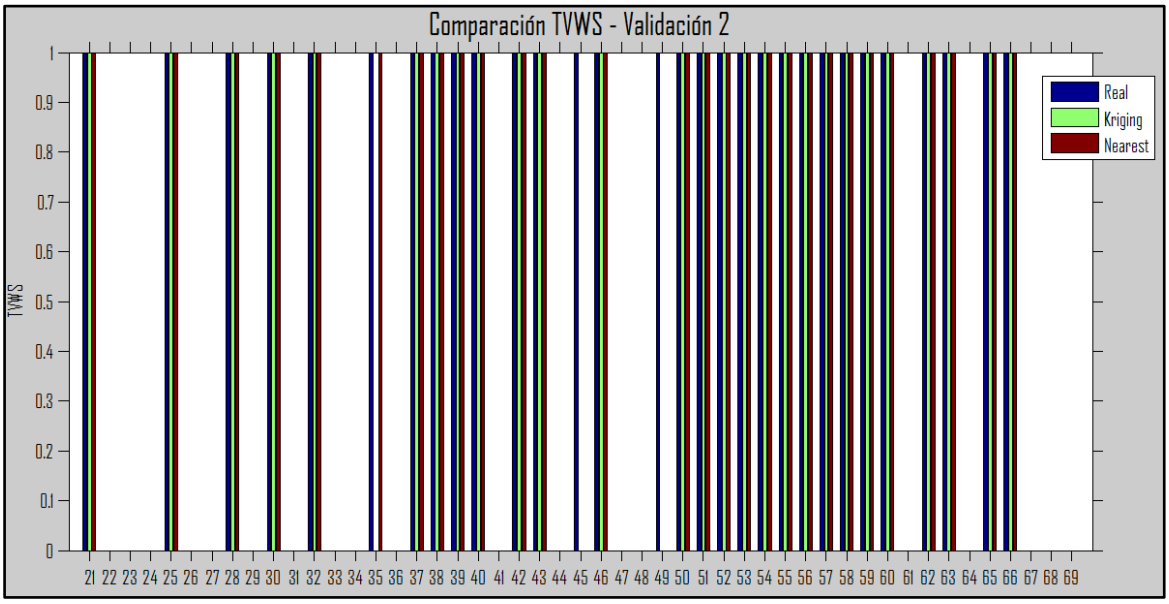


Figura 72. Comparación detección TVWS real y detección TVWS de los A.I *Kriging* y *Nearest* en el punto Validación 2

Se empieza analizando el canal 35, por el cual emitía el antiguo múltiple local de Vic pero que todavía sigue emitiendo. Según el punto Validación 2 medido es un TVWS pero según el punto estimado mediante el A.I *Kriging* no lo es. Esto se debe a que uno de los puntos nodales que se considera para realizar la interpolación recibe la señal del múltiple local de Vic aunque la

potencia sea baja y esto hace que en el punto estimado aparezca como ocupado. Esto se considera un punto a favor ya que como hemos dicho antes aporta mayor robustez al sistema y reduce la posibilidad de causar interferencias a usuarios legítimos.

Para estimar el punto Validación 2 en el caso del A.I *Kriging* se coge el punto Nodal 3 y el punto Nodal 6 (Figura 73). En el caso del A.I *Nearest* solamente se coge el punto Nodal 3.

Figura 73. Punto Validación 2 y puntos nodales que intervienen en la interpolación

En el punto Nodal 3 no se observa ninguna señal de televisión como se puede apreciar en el espectro del canal 35 (Figura 74). Es por este motivo que en la estimación mediante el A.I *Nearest* se considera que es un TVWS.

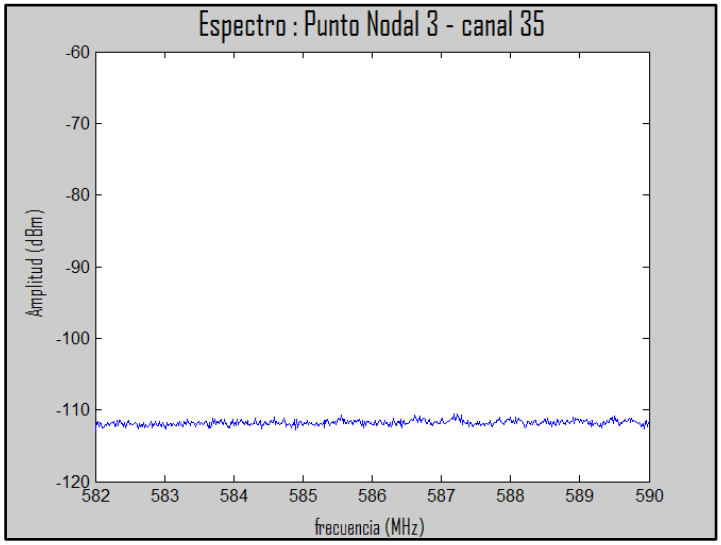


Figura 74. Espectro canal 35 punto Nodal 3

En cambio en el punto Nodal 6 sí que se detecta una mínima señal de TDT (Figura 75). Por este motivo el A.I *Kriging* no lo detecta como TVWS. El A.I *Kriging* permite detectar señales de televisión aunque sean mínimas que otros algoritmos como el *Nearest* serían incapaces de percibir. Aunque el punto de Validación 2 se acercara al punto Nodal 6 pero aún estuviera más cerca del punto Nodal 3, el A.I *Nearest* seguiría dando el canal como libre cuando realmente se podría estar recibiendo una señal de televisión. Por lo tanto se puede considerar que los resultados que nos aporta el A.I *Kriging* son más acurados.

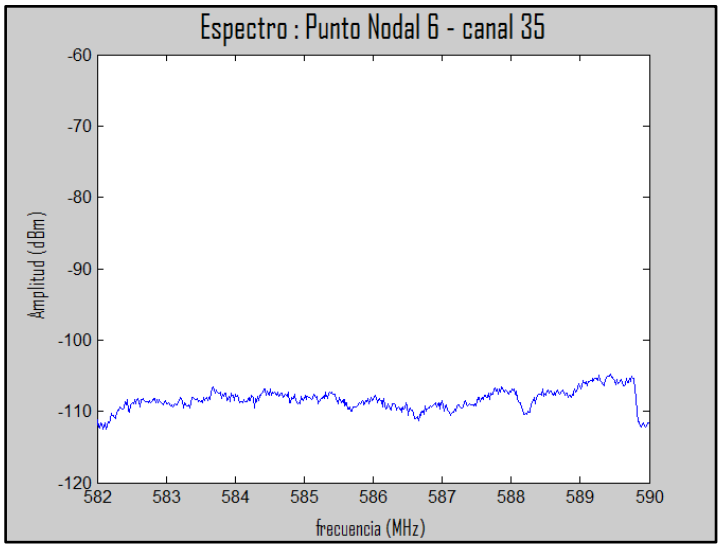


Figura 75. Espectro canal 35 punto Nodal 6

En el canal 45 ocurre lo mismo pero en este caso afecta la señal procedente del múltiple local de Sabadell. En esta ocasión el punto más próximo también recibe una señal de este múltiple local y es por eso que aparece ocupado tanto en la estimación mediante el A.I *Kriging* como mediante A.I *Nearest*.

En el canal 49 lo que ocurre es que hay una señal espuria sin identificar que nos falsea los resultados en ambos algoritmos de interpolación (Figura 76).

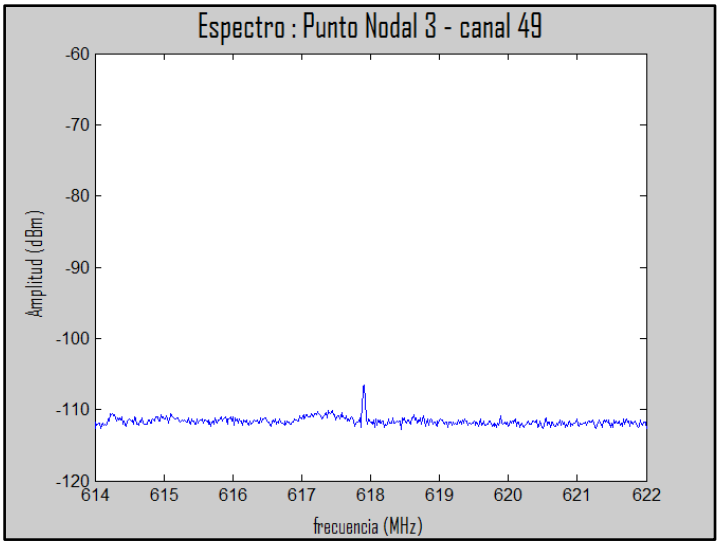


Figura 76. Espectro canal 49 punto Nodal 3

Para el análisis del punto Validación 3, se realiza una pequeña modificación en el A.I *Nearest* para poder apreciar más claramente el potencial del A.I *Kriging*. En este caso para realizar el A.I *Nearest*, en vez de coger el punto que está más próximo punto y que a la vez es el punto que tiene buena visibilidad a la Torre de Collserola (Nodal 4), se coge otro punto nodal prácticamente a la misma distancia para poder estimar el punto Validación 3 (Nodal 8). El punto elegido no tiene tanta visibilidad directa como el anterior y permite ver los resultados más claramente. Se ha de tener en cuenta que estamos hablando de un caso forzado pero que podría ser perfectamente real ya que ambos puntos nodales se encuentran a distancias parecidas al punto Validación 3 y el A.I *Nearest* podría haber cogido cualquiera de los dos. Se pueden ver los puntos en el *Google Earth* (Figura 77), primero se cogía el punto Nodal 4 para realizar el A.I *Nearest* y ahora el punto Nodal 8.

Figura 77. Punto Validación 3 y puntos nodales 4 y 6

En la Figura 78 se observa la comparación en el punto Validación 3 con la modificación realizada en el A.I *Nearest*. En este caso se puede ver que se detectan los mismos TVWS en los tres casos excepto en los canales 28, 35, 39 y 45.

Lo que se ha visto anteriormente en el punto Validación 2 con el canal 35, ahora se vuelve a repetir con los canales 35, 39 y 45. En estos casos el A.I *Nearest* no es capaz de detectar los canales locales que se emiten a una distancia considerable. En cambio, el A.I *Kriging* al utilizar los dos puntos nodales para realizar la interpolación es capaz de percibir esa señal.

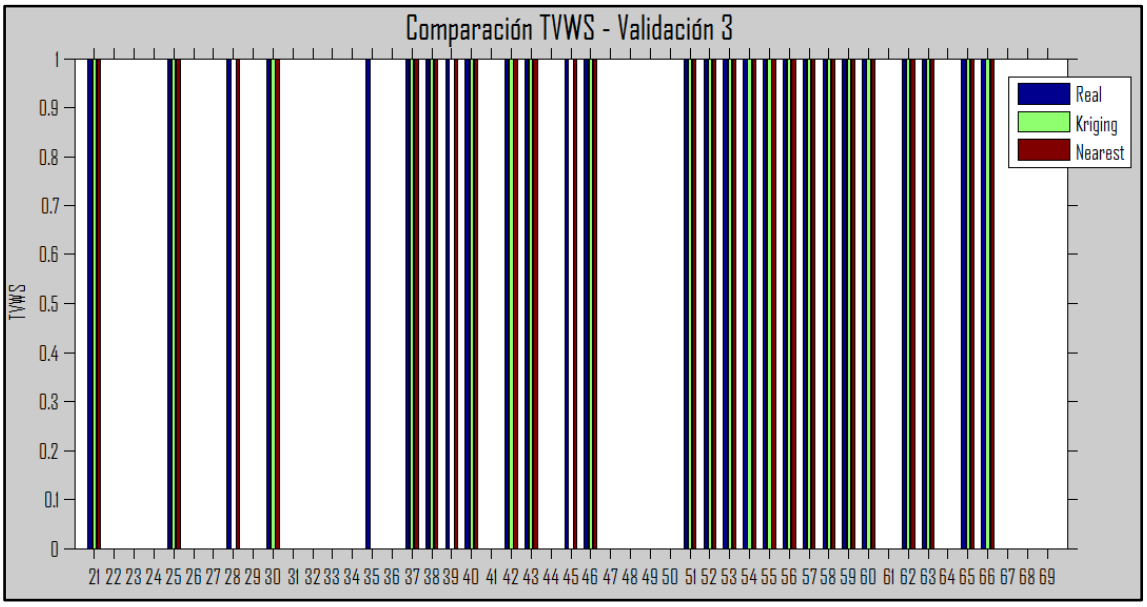


Figura 78. Comparación detección TVWS real y detección TVWS de los A.I *Kriging* y *Nearest* en el punto Validación 3

En concreto, en el canal 39 se emite uno de los múltiples locales de Sabadell. En cambio en el canal 28 se encuentra una señal TDT sin identificar (Figura 79).

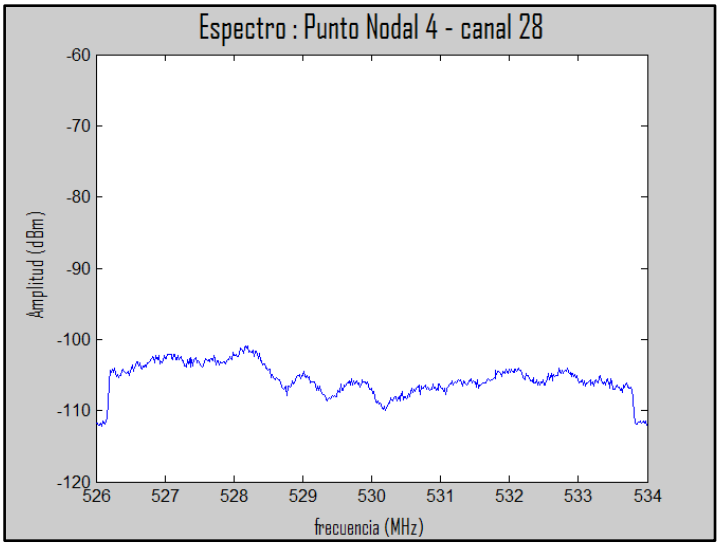


Figura 79. Espectro canal 28 punto Nodal 4

6.2 Comparación A.I: *Kriging* y *Inverse Distance Weighted* (IDW)

Al analizar los resultados del A.I *Kriging* se observa que se obtienen buenos resultados cuando se reduce el radio y sólo se tienen en cuenta los puntos más próximos. Esto se produce debido a que los puntos que están a más alejados no están correlados con los puntos próximos y distorsionan el promedio.

El hecho de tener un radio de 0.75 Km como óptimo y de tener una resolución entre puntos de 1 Km hace que sólo se utilicen dos o tres puntos nodales para realizar la interpolación. Cabe recordar que para minimizar el error de la estimación, el A.I *Kriging* utiliza para calcular los pesos tanto la correlación entre el punto a estimar y los puntos nodales, como la correlación entre los puntos nodales entre sí (apartado 3.2.3). Mientras que el A.I IDW, basa los pesos sólo en la relación existente del punto a estimar con los puntos nodales, sin tener ninguna información sobre qué relación tiene los puntos nodales entre sí.

Se puede llegar a la conclusión de que al realizar la interpolación con pocos puntos nodales y tener poca información de la relación entre ellos, el A.I *Kriging* no pueda aprovechar todo su potencial y pueda tener un comportamiento parecido al A.I IDW. Debido a esta conclusión se procedió a implementar el A.I IDW para ver si realmente tenía un comportamiento parecido.

Se decidió probar ambos algoritmos en el punto de validación 1. Para este punto y un radio de 0.75 Km se utilizan tres puntos nodales para realizar la interpolación (Figura 56). Los pesos asignados a cada uno de los puntos nodales con cada A.I son los siguientes:

***Kriging*:** $w = (0.2346\ 0.4524\ 0.3130)$

IDW: $w = (0.2433\ 0.4762\ 0.2805)$

A partir de los pesos, podemos calcular la potencia en cada uno de los canales del punto a estimar ($\hat{P}$) a partir de la potencia de los puntos nodales (P_n) (6-3).

$$\hat{P} = \sum_{n=1}^{3} w_n P_n \qquad (6\text{-}3)$$

Como se puede ver, ambos algoritmos asignan unos pesos muy parecidos a los puntos nodales. Esto hace que tengan un comportamiento similar, obteniendo una pequeña mejora en el caso del A.I *Kriging* al tener en cuenta la correlación entre los puntos nodales (Figura 80).

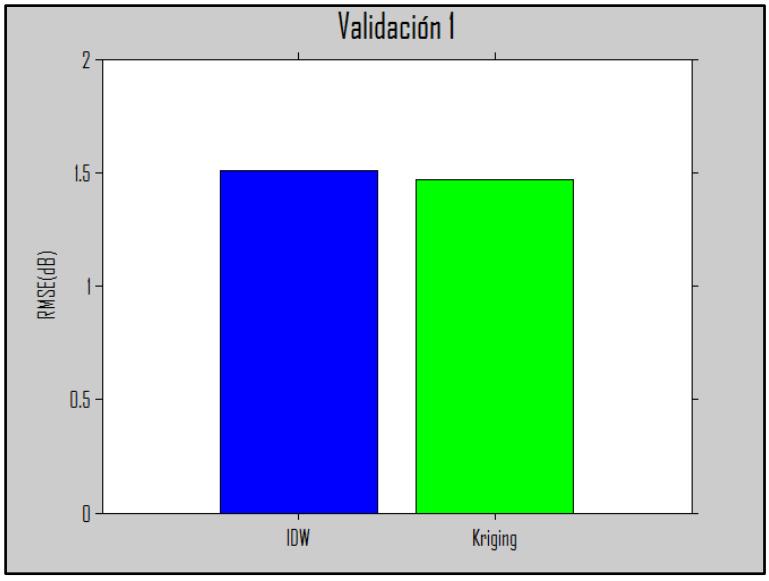


Figura 80. RMSE para los A.I IDW y *Nearest* para un radio de 0.75 Km y una resolución de 1 Km

Finalmente, se concluye que realmente sucede lo que se había planteado inicialmente. Por lo tanto, se debería considerar reducir la resolución entre puntos para que se produjera una mejora del A.I *Kriging* respecto al A.I IDW. Debido a la dificultad de reducir la resolución en áreas extensas como la zona norte del AMB, desde aquí se abre la posibilidad de probar el A.I *Kriging* en entornos pequeños y volver a validar el REM creado para poder cuantificar las mejoras entre ambos algoritmos al aumentar notablemente los puntos nodales.

7. Conclusiones y líneas futuras

Actualmente existe una demanda cada vez mayor de servicios inalámbricos de banda ancha, ya que se han convertido en una necesidad para la sociedad y además, se asocia el aumento de la banda ancha con crecimiento económico, muy importante en la época actual de crisis que se está viviendo. Se requiere espectro para hacer frente a esta gran demanda, pero existe una aparente escasez, pues la mayoría ya se encuentra asignado a los titulares de licencia a largo plazo. Campañas de medidas realizadas en los últimos años han demostrado que este espectro ya asignado se encuentra en muchos casos infrautilizado. Para lidiar con esta infrautilización del espectro se plantea hacer un uso secundario del espectro a partir de un acceso dinámico al mismo, y aquí aparece el concepto de *Cognitive Radio* (CR) que, como se ha visto anteriormente, ofrece grandes posibilidades al adaptarse al entorno donde se encuentra. La CR permite modificar sus características de transmisión y recepción para poder hacer un uso secundario del espectro mientras no esté siendo utilizado por los usuarios primarios con legitimidad sobre él. Esto permite aprovechar esa parte del espectro inutilizada llamada *white space*. En la campaña de medidas realizada en la región de Badalona y alrededores, se ha podido comprobar el gran número de *white spaces* que existen en la banda de televisión debido al paso de la televisión analógica a la televisión digital. Se han llegado a contabilizar entre 22 y 26 TV *White Spaces* dependiendo del punto de validación medido, los cuales corresponden a entre 176 y 208 MHz libres, de los cuales 56 MHz se encuentran libres de manera consecutiva del canal 54 al canal 60. Todo este espectro inutilizado en la banda de televisión hace idóneo el uso de la *Cognitive Radio* y la utilización de estos TVWS para prestar otros servicios como por ejemplo las comunicaciones vía móvil. Además, esta banda espectral ofrece buenas condiciones de propagación y las transmisiones tienen una naturaleza estática, es decir, los centros emisores son fijos, no cómo otras bandas espectrales en las que operan servicios en que el transmisor puede moverse continuamente y se hace más complicada su detección. Aunque recientemente se hayan producido modificaciones en el espectro debido a la liberación del Dividendo Digital, una vez se libere definitivamente y se estabilice, el espectro en esta banda sufrirá pocas variaciones, lo que permitirá realizar un análisis del entorno mucho más fácilmente.

Para facilitar la función de detección del espectro inutilizado a los dispositivos *Cognitive Radio* aparece el concepto del REM, el cual es una base de datos inteligente donde se almacena información actualizada sobre la ocupación espectral del entorno. En el caso de un REM de TVWS los dispositivos a partir de su localización consultan el REM para determinar si existe

algún TVWS en el punto donde se encuentran para poder operar y hacer uso mientras no se interfiera a un usuario primario. Un REM se puede crear mediante la identificación de los transmisores y la aplicación de modelos de propagación o mediante la interpolación espacial. En este proyecto el objetivo ha sido crear un REM de TVWS a partir de los puntos nodales previamente medidos y algoritmos de interpolación (A.I). El uso de la interpolación permite estimar el valor de puntos no conocidos de un entorno determinado a partir de medidas hechas anteriormente en puntos conocidos. En concreto, se ha elegido el A.I *Kriging* para la creación de un REM de TVWS. Los puntos nodales de los que se partía para realizar la interpolación eran puntos nodales medidos en la zona norte del AMB, en concreto de la región de Badalona y alrededores. También se midieron otros puntos para poder realizar la validación del REM creado, denominados puntos de validación. Se es consciente de que los puntos medidos pueden sufrir ligeras modificaciones en los próximos meses debido a la liberación definitiva del Dividendo Digital. Pero esto no supone ningún un problema, ya que el objetivo principal del proyecto es crear un REM de TVWS a partir de algoritmos de interpolación y ver el rendimiento que ofrece para poder ser implantado en un futuro. Aunque la potencia de algunos canales sufra modificaciones en un futuro no es relevante debido a que ya se habrán extraído las conclusiones pertinentes al validar el REM de TVWS creado a partir del A.I *Kriging*. Lo que sí que es importante para futuras campañas de medidas es que se sea consciente de los posibles cambios que se puedan producir en el espectro y que se tomen todas en un espacio de tiempo reducido para que no haya modificaciones en el espectro entre diferentes medidas y que se fije un protocolo de actualización. En este proyecto se ha tenido esto en cuenta, ya que todas las medidas fueron llevadas a cabo en el mes de noviembre, justo después de la reordenación de los canales de televisión pasándose a utilizar solamente la banda 470-792MHz y permitiendo la liberación del Dividendo Digital (790-860 MHz).

Una vez construido el REM, el siguiente paso es validarlo para poder valorar el rendimiento que ofrece. Para poder validarlo se realiza una comparación entre el valor de un punto medido denominado punto de validación y el valor que estima en este mismo punto el REM que hemos creado por medio del A.I *Kriging* y puntos nodales. La comparación se realiza tanto en términos de estimación de la potencia por canal como en términos de detección de TVWS. Se ha podido concluir que el A.I *Kriging* ofrece buenos resultados, sobre todo cuando se reduce el radio y se eligen los puntos nodales que están a menos de 0.75 Km para realizar la interpolación, ya que los puntos que se encuentran a una distancia superior no están correlados con los puntos próximos y distorsionan el promedio del punto a estimar. Por lo tanto se eligió un radio de 0.75 Km como radio óptimo para una resolución entre puntos de 1 Km.

A continuación se compararon los resultados obtenidos con otro algoritmo de interpolación, el *Nearest Neighbor*, que se basa en estimar un punto basándose en el punto nodal que tiene más cercano. Se vio que ambos ofrecen rendimientos similares en términos de error en la estimación de la potencia por canal, pero a la hora de la detección de TVWS el A.I *Kriging* era mucho más fiable, permitiendo una detección más conservadora y aportando una mayor robustez al sistema, ideal en este escenario para no interferir en ningún caso a los usuarios primarios.

Con un radio de 0.75 Km y una resolución de 1 Km, se tienen en cuenta dos o tres puntos, dependiendo del punto de validación elegido, para realizar la estimación con el A.I *Kriging*. Este algoritmo para minimizar el error en la estimación utiliza tanto la relación entre los puntos nodales y el punto a estimar como la relación entre los puntos nodales. Al tener pocos puntos nodales para realizar la interpolación se llegó a la conclusión de que no se aprovechaba todo el potencial que dispone el A.I *Kriging* y que podría tener un comportamiento parecido a otro algoritmo de interpolación analizado, el IDW. A diferencia del A.I *Kriging*, el A.I IDW sólo tiene en cuenta la relación entre los puntos nodales y el punto a estimar, obviando la relación que existe entre los puntos nodales. Se decidió implementar el A.I IDW para poder corroborar estas conclusiones. Una vez analizado, se pudo observar que solamente se tiene una ligera mejora al realizar la interpolación con el algoritmo *Kriging* debido al hecho que dispone de un poco más de información del escenario a la hora de realizar la estimación.

Para futuros proyectos, se considera interesante intentar reducir la resolución entre puntos para que se pueda realizar la interpolación con más puntos nodales y volver a validar el REM de TVWS para poder cuantificar la mejora del A.I *Kriging* respecto el A.I IDW. Debido a la dificultad de reducir la resolución en zonas como el AMB, se considera una buena opción llevarla a cabo en entornos reducidos donde se pueden conseguir resoluciones más pequeñas y a partir de ahí poder extraer conclusiones definitivas sobre el comportamiento del algoritmo de interpolación *Kriging* para la construcción de un REM de TVWS.

8. Bibliografía

[1] Liliana Bolea, Jordi Pérez-Romero, Ramón Agustí, Oriol Sallent, "Context Discovery Mechanisms for Cognitive Radio", 2011 IEEE.

[2] Gonzalo Vazquez Vilar, "Cognitive Radio: half empty or half full?", Junio 2010. Disponible en: http://spectralholes.blogspot.com.es/2010/06/cognitive-radio-half-empty-or-half-full.html

[3] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran y Shantidev Mohanty, "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks", IEEE Communications Magazine, Abril 2008.

[4] Joseph Mitola III and Gerald Q. Maguire, Jr, "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal", IEEE Personal Communications, August 1999.

[5] zoyok.com, "Radio Environmental Maps (REMS's) in Cognitive Radio Networks", Marzo 2013.
Disponible en: http://zoyok.com/blog/radio-environmental-maps-rem%E2%80%99s-cognitive-radio-networks

[6] H. Birkan Yilmaz, Tuna Tugcu, Fatih Alagöz y Suzan Bayhan, "Radio Environment Map as Enabler for Practical Cognitive Radio Networks", IEEE Communications Magazine, Diciembre 2013.

[7] Joseph W. Mwangoka, Paulo Marques y Jonathan Rodriguez, "Exploiting TV White Spaces in Europe: The COGEU Approach", 2011 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN).

[8] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, "¿Qué es el dividendo digital y en qué consiste su liberación?".

Disponible en: http://www.televisiondigital.gob.es/DividendoDigital/Paginas/que-es-dividendo-digital.aspx

[9] Wikipedia, "Dividendo Digital".
Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Dividendo_Digital

[10] 3.bp.blogspot.com, "Bandas UHF IV y V (470 - 862 MHz)".
Disponible en: http://3.bp.blogspot.com/-7HsFTbxJ6as/Un1CvbizVLI/AAAAAAAAAkw/TBSsGnMlgI4/s1600/UHF+Bandas.jpg

[11] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, "Proyecto real decreto por el que se aprueba el plan técnico nacional de la televisión digital terrestre y se regulan determinados aspectos para la liberación del dividendo digital", Mayo 2014.
Disponible en: http://www.coettc.com/docs/noticias/tdt.pdf

[12] Wikipedia, "Televisión digital".
Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Televisi%C3%B3n_digital

[13] Wikipedia, "DVB-T".
Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/DVB-T

[14] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, "¿Qué es la TDT?".
Disponible en: http://www.televisiondigital.gob.es/TDT/Paginas/que-es-tdt.aspx

[15] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, "Información general sobre la televisión digital".
Disponible en:
http://www.televisiondigital.gob.es/TelevisionDigital/Paginas/informacion-general.aspx

[16] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, "El proceso de liberación del Dividendo Digital en España", Octubre 2014.
Disponible en:
http://www.ontinyent.es/sites/ontinyent.portalesmunicipales.es/files/Presentaci%C3%B3n-Dividendo-Digital_Entidades-Locales.pdf

[17] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, "El Ministerio de Industria, Energía y Turismo amplía hasta el 31 de marzo el plazo máximo para la liberación del Dividendo Digital", Notas de prensa, Diciembre 2014.
Disponible en: http://www.minetur.gob.es/es-ES/GabinetePrensa/NotasPrensa/2014/Paginas/20141226-amplicacion-dd.aspx

[18] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, "Televisión digital (TD)".
Disponible en: http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/RadioTV/TD/Paginas/TD.aspx

[19] mundoplus.tv, "Canales definitivos por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo".
Disponible en: http://www.mundoplus.tv/zonatdt/frecuencias_tdt_canalesdefinitivos.php

[20] antenas-parisat-madrid.com, "Organización de los canales de TDT nacionales y autonómicos a partir del 26 de octubre de 2014", Octubre 2014.
Disponible en: http://www.antenas-parisat-madrid.com/es/noticias+detalle/organizacion-de-los-canales-de-tdt-nacionales-y-autonomicos-a-partir-del-26-de-octubre-de-2014/

[21] mundoplus.tv, "Oferta de Canales: canales autonómicos (Cataluña)".
Disponible en: http://www.mundoplus.tv/zonatdt/canales_tdt_buscar.php?amb=CAT

[22] canaltdt.es, "TV3 HD seguirá emitiendo gracias a un alquiler de un canal del Grupo Godó", Diciembre 2014.
Disponible en: http://canaltdt.es/2014/12/23/tv3-hd-seguira-emitiendo-gracias-al-alquiler-de-un-canal-del-grupo-godo/

[23] mundoplus.tv, "Oferta de Canales: canales locales (Barcelona)".
Disponible en: http://www.mundoplus.tv/zonatdt/canales_tdt_buscar.php?amb=CAT&dem=B

[24] Markus Mueck y Dominique Noguet, "TV White Space Standardization and Regulation in Europe", 2011 IEEE.

[25] Dimitris Makris, Georgios Gardikis y Anastasios Kourtis, "Quantifying TV White Space Capcity: A Geolocation-Based Approach, IEEE Communications Magazine, Septiembre 2012.

[26] Jaap Van De Beek, Janne Riihijärvi y Petri Mähönen, "Intrinsic challenges (and oportunities) to deploy LTE in Europe's TV white spaces", Future Network and MobilSummit, 2012.

[27] Wikipedia, "Nearest neighbor algorithm".
Disponible en: http://en.wikipedia.org/wiki/K-*nearest_neighbor*s_algorithm

[28] ArcGIS Resources, "How inverse distance weighted interpolation works".
Disponible en:
http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//00310000002m000000

[29] Bioenvironmental Engineering Division, University of Illinois, "Inverse-distance weighted method (IDW)".
Disponible en:
http://age-web.age.uiuc.edu/classes/age357/ABE459_08/html/Interpolation.pdf

[30] ArcGIS Resources, "How Kriging works".
Disponible en:
http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z00000076000000

[31] Geoff Bohling, "KRIGING", Kansas Geological Survey, C&PE 940, Octubre 2005.

[32] Wikipedia, "Krigeaje".
Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Krigeaje

[33] Aularagón, Gobierno de Aragón, "Las coordenadas geográficas. Latitud y longitud".
Disponible en: http://www.aularagon.org/files/espa/atlas/longlatitud_index.htm

[34] Ever Wilson y Bruno Orlando, "Coordenadas UTM".
Disponible en: http://es.slideshare.net/silveriopari/coordenadas-utm-definitivo

[35] Alejandro Romero, "Coordenadas UTM".
Disponible en: http://es.slideshare.net/profenatu/coordenadas-utm

[36] atecorp.com, "Technical Data Sheet. Spectrum Master, High Performance Handheld, Spectrum Analyzer MS2721B 9 kHz to 7.1 GHz"
Disponible en: http://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/data-sheets/Anritsu-MS2721B_Datasheet.pdf

[37] AOR, "Catalog discone antenna DA753G".
Disponible en: http://www.aorja.com/antennas/da753g.html

[38] Mini Circuits, "Connectorized Band Stop Filter NSBP-108+".
Disponible en: http://www.minicircuits.com/pdfs/NSBP-108+.pdf

[39] manualslib.com, "GPS 18x Technical Specifications".
Disponible en: http://www.manualslib.com/manual/413938/Garmin-Gps-18x.html

[40] Aitor Gastón, "Cartografía para Google Earth. Términos Municipales (España peninsular y Baleares)".
Disponible en: http://www.aitorgaston.com/tm.php

[41] Pedro Delicado Alcántara, "Medidas para la construcción de un REM (Radio Environment Map) de TVWS en la mitad norte del Área metropolitana de Barcelona", PFC realizado en la ETSETB, Barcelona, Septiembre 2014.

[42] Manuel de Luna, El Periódico, "La ultra alta definición llega a BCN", Febrero 2014.
Disponible en: http://www.elperiodico.com/es/noticias/tele/ultra-alta-definicion-llega-bcn-3140161

[43] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, "Comunidad Autónoma de Cataluña".
Disponible en:
http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/RadioTV/TD/Digital/Demarcaciones%20TD%20local/DemarcacionesTDCataluna.pdf