



CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE CLUSTERIZACIÓN

ANDRÉS FERRANDO NAVARRO

Tutor: LORENZO RUBIO ARJONA

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2020-21

Valencia, 9 de julio de 2021

Agradecimientos

En este espacio me gustaría agradecer el apoyo a todos los que han estado a mi lado durante estos cuatro años, tanto a la familia como a los amigos. Especialmente a mis padres y a mi novia por estar en los momentos más difíciles. Y sin duda, al tutor de este trabajo, Lorenzo Rubio Arjona, por su dedicación e implicación durante estos meses.

A todos ellos, gracias de corazón.

Resumen

En este Trabajo Final de Grado se ha realizado una caracterización teórica y experimental del canal radio en las bandas definidas en el despliegue del estándar de comunicaciones 5G en ondas milimétricas. Para ello, se parte de una campaña de medidas que permite obtener la respuesta impulsional del canal a partir de la cual se derivan sus parámetros característicos de dispersión temporal (*delay spread*) y ancho de banda de coherencia. Las medidas se realizaron en el dominio de la frecuencia en la banda de 25 a 40 GHz. A partir del análisis de las medidas, se ha realizado la clusterización del PDP (*Power Delay Profile*) permitiendo así agrupar las distintas contribuciones multicamino con retardos y amplitudes similares. Finalmente, tras la clusterización, se ha parametrizado el PDP tomando como referencia el modelo de Saleh-Valenzuela.

Resum

En aquest Treball Final de Grau s'ha realitzat una caracterització teòrica i experimental del canal ràdio a les bandes definides en el desplegament de l'estàndard de comunicacions 5G en ones mil·limètriques. Per això, es parteix d'una campanya de mesures que permet obtenir la resposta impulsional del canal, a partir de la qual es deriven els seus paràmetres característics de dispersió temporal (*delay spread*) i ample de banda de coherència. Les mesures es van realitzar en el domini de la freqüència en la banda de 25 a 40 GHz. A partir de l'anàlisi de les mesures, s'ha realitzat la clusterització del PDP (*Power Delay Profile*), de manera que s'agrupen les contribucions multicamí amb retards i amplituds similars. Finalment, després de la clusterització, s'ha parametritzat el PDP prenent com a referència el model de Saleh-Valenzuela.

Abstract

In this Final Degree Project, a theoretical and experimental characterization of the radio channel has been carried out in the bands defined in the deployment of the 5G communications standard in millimeter waves. In order to do this, a measurement campaign was provided, where the impulse response of the channel was obtained. From the impulse response, its characteristic parameters of temporal dispersion (*delay spread*) and coherence bandwidth are derived. The measurements were made in the frequency domain in the band from 25 to 40 GHz. After the analysis of the measurements, the clustering of the PDP (*Power Delay Profile*) has been carried out, grouping different multipath contributions with similar delays and amplitudes. Finally, using the outcome from clustering, the PDP has been parameterized using the Saleh-Valenzuela model as a reference.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organización de la memoria	2
2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	3
2.1. Gestión del proyecto	3
2.2. Descripción y planificación de las tareas	3
2.3. Distribución temporal de las actividades	4
3. ASPECTOS TEÓRICOS	5
3.1. Introducción	5
3.2. Descripción del canal radio en banda estrecha	5
3.3. Descripción del canal radio en banda ancha	6
3.4. Métricas para el análisis de la dispersión temporal	8
3.5. Análisis del PDP y clusterización	9
3.6. Modelado del canal: modelo Saleh-Valenzuela	14
4. DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS	16
4.1. Breve descripción de la sonda de medidas	16
4.2. Entorno de propagación	16
4.3. Configuración de la campaña de medidas	18
5. ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS	20
5.1. Introducción	20
5.2. <i>Average Power Delay Profile</i>	20
5.3. Dispersión temporal	22
5.4. Ancho de banda de coherencia	29
5.5. Clusterización	37
5.6. Parametrización del canal	43
6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	51
6.1. Conclusiones	51
6.2. Líneas futuras	52
Bibliografía	53

Índice de figuras

3.1. Efecto de la propagación multicamino. Fuente: [4].	6
3.2. Modelo circuital de la respuesta impulsional del canal.	7
3.3. Función de autocorrelación del canal.	9
3.4. Diagrama de flujo del algoritmo de clusterización.	10
3.5. Esquema del criterio de definición de clústeres.	11
3.6. Clusterización del APDP de la posición 6 de la banda B1 para un valor de $k = 20$	12
3.7. Clusterización del APDP de la posición 6 de la banda B1 para un valor de $k = 50$	13
3.8. Clusterización del APDP de la posición 6 de la banda B1 con el umbral temporal escogido.	14
3.9. Esquema del modelo Saleh-Valenzuela.	15
4.1. Entorno de propagación. Fuente: [11].	17
4.2. Esquema del equipo de medidas. Fuente: [11].	17
4.3. Distribución de las posiciones de los transmisores y del receptor para las medidas realizadas. Fuente: [11].	18
4.4. Ejemplo de posición en LOS (izquierda) y OLOS (derecha). Fuente: [11].	19
5.1. LOS APDP en dB de la banda B1 en la posición 1.	21
5.2. Comparación LOS y OLOS para los APDP en dB de las posiciones 1 y 11 de la banda B1.	22
5.3. CDF de σ_{rms} en LOS y OLOS para la banda B1.	23
5.4. Relación entre la distancia y σ_{rms} en LOS para la banda B1.	24
5.5. CDF de σ_{rms} en LOS y OLOS para la banda B2.	25
5.6. Relación entre la distancia y σ_{rms} en LOS para la banda B2.	26
5.7. CDF de σ_{rms} en LOS y OLOS para la banda B3.	27
5.8. Relación entre la distancia y σ_{rms} en LOS para la banda B3.	27
5.9. CDF de σ_{rms} en LOS y OLOS para la banda B4.	28
5.10. Relación entre la distancia y σ_{rms} en LOS para la banda B4.	29
5.11. Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90% y σ_{rms} en situación de LOS para la banda B1.	30
5.12. Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90% y σ_{rms} en situación de OLOS para la banda B1.	31
5.13. Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90% y σ_{rms} en situación de LOS para la banda B2.	32
5.14. Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90% y σ_{rms} en situación de OLOS para la banda B2.	33
5.15. Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90% y σ_{rms} en situación de LOS para la banda B3.	34

5.16. Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90 % y σ_{rms} en situación de OLOS para la banda B3.	34
5.17. Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90 % y σ_{rms} en situación de LOS para la banda B4.	36
5.18. Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90 % y σ_{rms} en situación de OLOS para la banda B4.	36
5.19. Verificación del funcionamiento del algoritmo.	37
5.20. Clusterización del APDP de la posición 4 de la banda B1.	38
5.21. Clusterización del APDP de la posición 11 de la banda B1.	38
5.22. Clusterización del APDP de la posición 7 de la banda B2.	39
5.23. Clusterización del APDP de la posición 14 de la banda B2.	39
5.24. Clusterización del APDP de la posición 1 de la banda B3.	40
5.25. Clusterización del APDP de la posición 13 de la banda B3.	40
5.26. Clusterización del APDP de la posición 10 de la banda B4.	41
5.27. Clusterización del APDP de la posición 12 de la banda B4.	41
5.28. Ejemplo del caso descrito donde el algoritmo no detecta correctamente el último clúster como único.	42
5.29. Justificación del umbral escogido para eliminar valores singulares de γ obtenidos tras la clusterización.	43
5.30. Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 9 de la banda B1.	47
5.31. Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 13 de la banda B1.	47
5.32. Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 5 de la banda B2.	48
5.33. Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 14 de la banda B2.	48
5.34. Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 10 de la banda B3.	49
5.35. Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 11 de la banda B3.	49
5.36. Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 1 de la banda B4.	50
5.37. Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 12 de la banda B4.	50

Índice de tablas

1.1. Bandas de frecuencia analizadas de acuerdo a la estandarización de la ITU.	1
3.1. Valores mínimos y máximos del umbral temporal para la clusterización en las bandas de análisis.	12
4.1. Distancias entre el transmisor y el receptor en metros.	18
4.2. Configuración de las medidas.	19
5.1. Estadísticos del <i>delay spread</i> para la banda B1.	23
5.2. Parámetros del ajuste lineal entre d_{TX-RX} y σ_{rms} para la banda B1.	24
5.3. Estadísticos del <i>delay spread</i> para la banda B2.	25
5.4. Parámetros del ajuste lineal entre d_{TX-RX} y σ_{rms} para la banda B2.	25
5.5. Estadísticos del <i>delay spread</i> para la banda B3.	26
5.6. Parámetros del ajuste lineal entre d_{TX-RX} y σ_{rms} para la banda B3.	28
5.7. Estadísticos del <i>delay spread</i> para la banda B4.	28
5.8. Parámetros del ajuste lineal entre d_{TX-RX} y σ_{rms} para la banda B4.	29
5.9. Parámetros del ajuste entre el ancho de banda de coherencia y el <i>delay spread</i> para la banda B1.	31
5.10. Parámetros del ajuste entre el ancho de banda de coherencia y el <i>delay spread</i> para la banda B2.	33
5.11. Parámetros del ajuste entre el ancho de banda de coherencia y el <i>delay spread</i> para la banda B3.	35
5.12. Parámetros del ajuste entre el ancho de banda de coherencia y el <i>delay spread</i> para la banda B4.	35
5.13. Valores de los parámetros del modelo SV para la banda B1.	44
5.14. Valores de los parámetros del modelo SV para la banda B2.	44
5.15. Valores de los parámetros del modelo SV para la banda B3.	45
5.16. Valores de los parámetros del modelo SV para la banda B4.	46

Índice de acrónimos

APDP	Average Power Delay Profile
CDF	Cumulative Distribution Function
FIR	Finite Impulse Response
GRE	Grupo de Radiación Electromagnética
IDSF	Input Delay Spread Function
IES	Interferencia Entre Símbolos
ITEAM	Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia
ITU-R	Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones
LOS	Line-of-Sight
ML	Machine Learning
OLOS	Obstructed Line-of-Sight
PDP	Power Delay Profile
SAGE	Space-Alternating Generalized Expectation-maximization
STD	Standard Deviation
SV	Saleh-Valenzuela
TFG	Trabajo de Fin de Grado
UPV	Universidad Politécnica de Valencia
VNA	Vector Network Analyzer

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

Debido a los constantes cambios que sufren las tecnologías y a la necesidad de satisfacer la gigantesca demanda cada vez más exigente de los usuarios, es necesario desarrollar sistemas de comunicaciones más rápidos y eficientes. Bajo este contexto surge el estándar 5G como sucesor de LTE 4G con el fin de aumentar la velocidad de descarga y reducir la latencia en las comunicaciones.

En la definición de nuevos estándares, resulta indispensable realizar una caracterización práctica del comportamiento del canal radioeléctrico, pues conocer, entre otros, la dispersión temporal del canal es vital para el desarrollo de esquemas de comunicación que se adecúen a estos estándares. De igual forma, la importancia de aproximar medidas a modelos de propagación teóricos resulta evidente a la hora de simular nuevos mecanismos de transmisión.

Bajo este contexto surge este Trabajo Fin de Grado (TFG), en el cual en base a unas medidas realizadas en un escenario de interiores se extraerán estadísticos de la dispersión temporal, los cuales serán de gran utilidad para definir clústeres de las contribuciones multicamino. Finalmente, a partir de dicha agrupación, se obtendrán los parámetros del modelo de propagación más adecuado, definiendo así el entorno de propagación medido.

Como la motivación del trabajo reside en la banda de ondas milimétricas, en la cual se prestarán los servicios de telecomunicaciones 5G, en la Tabla 1.1 se recogen las bandas de frecuencias para las cuales se realizará un estudio específico, de acuerdo con lo propuesto por el Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (*ITU-R*, por sus siglas en inglés) en [1]:

Banda	B1	B2	B3	B4
Frecuencias (GHz)	25 a 27.5	27.5 a 29.5	31.8 a 33.4	37 a 40

Tabla 1.1: Bandas de frecuencia analizadas de acuerdo a la estandarización de la ITU.

1.2. Objetivos

En esta sección se definen los dos objetivos de este TFG. El primer objetivo es la obtención de modelos de canal basados en el PDP para escenarios de interior. Con este fin se estudiará una campaña de medidas en un entorno de oficina. En base a estas medidas, se realizará una caracterización experimental del canal en la que se analicen parámetros clave de la dispersión temporal, como lo son el *delay spread* y el ancho de banda de coherencia.

Por otro lado, el segundo objetivo de este TFG es aplicar técnicas de clusterización, que permiten agrupar y diferenciar un grupo de contribuciones del resto, para así generar dichos modelos de canal. La parametrización o modelos de canal que se desarrollen estarán basados en el modelo de Saleh-Valenzuela, ampliamente utilizado en este tipo de escenarios [2].

1.3. Organización de la memoria

La memoria se estructura de la siguiente forma:

- En el capítulo 2 se presenta la metodología seguida en el TFG, indicando las tareas realizadas y su distribución temporal.
- En el capítulo 3 se exponen los aspectos teóricos sobre los mecanismos y las ecuaciones que rigen el comportamiento de la dispersión temporal en el canal radioeléctrico.
- En el capítulo 4 se realiza una breve descripción de la campaña de medidas que será la base del análisis del canal.
- En el capítulo 5 se desarrollan los resultados obtenidos tras haber procesado la campaña de medidas, analizando la dispersión temporal del canal y la clusterización y parametrización del PDP.
- En el capítulo 6 se presentan las conclusiones y líneas futuras del TFG.

Capítulo 2

METODOLOGÍA DEL PROYECTO

2.1. Gestión del proyecto

Con el fin de realizar este TFG de forma eficiente ha sido necesaria una planificación temporal de las tareas llevadas a cabo. El punto de partida de dicha planificación es la búsqueda de fuentes bibliográficas que permitan estudiar el canal radioeléctrico y, en concreto, los mecanismos de dispersión temporal del canal. Posteriormente, sería necesario documentarse acerca de la clusterización y de los modelos de propagación en escenarios de interior.

Para realizar el análisis de estos mecanismos, fue necesario recurrir a una campaña de medidas realizada en el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM). Partiendo de dichas medidas, se realiza un extensa descripción y parametrización del canal radio, mediante funciones desarrolladas en el entorno de programación MATLAB.

Partiendo de los resultados obtenidos tras aplicar dichas funciones, se obtuvieron las conclusiones del TFG y se plantearon posibles líneas futuras sobre el mismo. Por último, se redactó la memoria.

2.2. Descripción y planificación de las tareas

Para la consecución de los objetivos de este TFG, se han llevado a cabo las siguientes tareas:

- Tarea 1 (*T1*): búsqueda bibliográfica y comprensión de la documentación usada, incidiendo en la tecnología 5G (bandas de frecuencia, principios de funcionamiento, características y usos).
- Tarea 2 (*T2*): descripción y análisis de los mecanismos básicos de propagación radioeléctrica.
- Tarea 3 (*T3*): estudio del funcionamiento de los algoritmos de clusterización para el *Power Delay Profile*.
- Tarea 4 (*T4*): programación de funciones en MATLAB que permitan extraer los estadísticos de dispersión temporal del canal.

- Tarea 5 (T5): desarrollo de un algoritmo en MATLAB capaz de automatizar la definición de los *clústeres*.
- Tarea 6 (T6): programación de un *script* que permita obtener los parámetros del modelo Saleh-Valenzuela a partir de la definición de los clústeres.
- Tarea 7 (T7): redacción de la memoria.

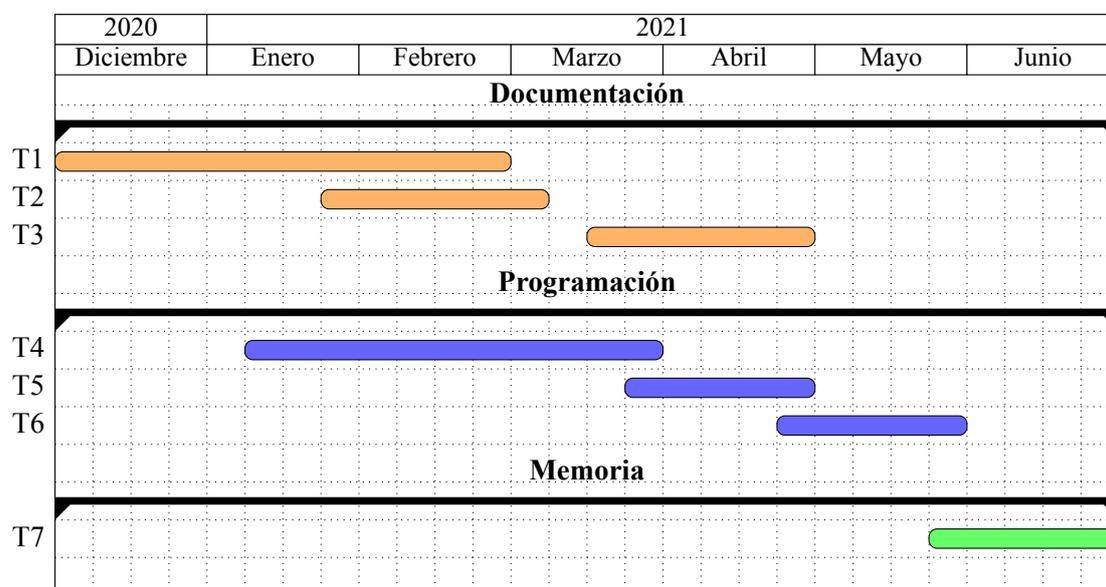
2.3. Distribución temporal de las actividades

Al finalizar el curso 2019-2020, se introdujo la propuesta de desarrollar este TFG. Sin embargo, debido a la carga de trabajo de las asignaturas del primer cuatrimestre, no se empezó a recabar la información necesaria para empezar hasta el mes de diciembre.

Tras haber finalizado los exámenes, en enero se empezaron a realizar las tareas de programación relacionadas con la caracterización de la dispersión temporal del canal. Posteriormente, tras consultar documentación acerca de la clusterización del canal, se empezó a desarrollar el algoritmo que permitiría la división del PDP en clústeres.

Una vez realizada la clusterización, se decidió emplear el modelo de Saleh-Valenzuela para describir el comportamiento del entorno de propagación. Finalmente, se redactó la memoria del TFG.

Con el fin de ilustrar de forma gráfica el desarrollo del proyecto, se presenta el siguiente diagrama de Gantt, en el cual se muestran las distintas partes en que se dividió el proyecto y sus respectivas tareas:



Capítulo 3

ASPECTOS TEÓRICOS

3.1. Introducción

En esta parte de la memoria se va a realizar una breve explicación teórica del comportamiento del canal radio durante los procesos de comunicación mediante ondas electromagnéticas. Analizar y comprender el canal radio desde un punto de vista teórico es esencial a la hora de desarrollar y validar cualquier sistema de telecomunicaciones, pues este representa el medio físico por el cual se va a propagar la señal. Este interés en determinar las propiedades del canal radica también en el hecho que los recursos espectrales disponibles son limitados y, por tanto, interesa aprovecharlos de la forma más eficiente posible.

3.2. Descripción del canal radio en banda estrecha

Una vez plasmada la importancia del análisis del canal de propagación, se debe mencionar que el canal radio es un canal complejo y variante en el tiempo, pues la propagación de la señal en espacio libre sufre diversas atenuaciones como consecuencia de la presencia de múltiples objetos que pueden bloquear parcial o totalmente la señal [3], como se muestra en la Figura 3.1.

Entre los principales mecanismos básicos de propagación que atenúan la intensidad de la señal se encuentran la reflexión y la difracción. Como consecuencia de estos fenómenos, el receptor del sistema recibirá no sólo una componente directa de la señal (siempre y cuando exista dicha visión directa entre transmisor y receptor), sino múltiples contribuciones retardadas respecto de la contribución principal.

Esto es lo que se conoce como efecto multicamino [3], fenómeno que induce la dispersión temporal. Para un pulso transmitido en un determinado instante de tiempo t_0 , se reciben diversos pulsos retardados en el receptor con retardos $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$. De acuerdo con esta descripción, teniendo en cuenta que se trate de un canal estático, se puede definir la señal recibida mediante la expresión [3]:

$$r(t) = \sum_{i=1}^N A_i s(t - \tau_i) = \left[\sum_{i=1}^N A_i e^{-j2\pi f_c \tau_i} \right] e^{j2\pi f_c t}, \quad (3.1)$$



Figura 3.1: Efecto de la propagación multicamino. Fuente: [4].

cuyos principales términos son N , número de contribuciones; A_i , amplitud de la contribución i -ésima; f_c , frecuencia a la que se transmite el pulso y τ_i , retardo de la componente i -ésima. Conocer el mecanismo de dispersión temporal es crítico para poder minimizar la interferencia entre símbolos (IES), la cual podría producirse en el caso que se transmitiesen varios tonos desde el transmisor, ya que en el receptor se produce el ensanchamiento temporal que se acaba de describir.

Por otra parte, si el receptor de la señal transmitida se desplaza durante la comunicación a una velocidad determinada v , la señal experimentará el efecto *doppler*, el cual se traduce en una selectividad temporal (*fading*), es decir, desvanecimientos temporales de la señal durante lapsos de tiempo muy cortos. Este efecto se puede cuantificar a partir de la anterior expresión, de forma que la señal recibida será en este caso [3]:

$$r(t) = \left[\sum_{i=1}^{N(t)} A_i(t) e^{-j2\pi f_c \tau_i(t)} e^{-j\beta v t \cos(\theta_i)} \right] e^{j2\pi f_c t}, \quad (3.2)$$

donde se aprecian como nuevos términos β , número de onda; v , velocidad del receptor y θ_i , ángulo formado por el vector velocidad del receptor y la dirección de llegada de la onda i -ésima.

3.3. Descripción del canal radio en banda ancha

Para poder obtener las métricas y estadísticas que permiten definir el comportamiento del canal radio de banda ancha, se recurre a las funciones conocidas en la literatura como funciones de Bello [5], las cuales permiten realizar una caracterización tiempo-frecuencia del canal.

En primer lugar, la función en el dominio temporal se describe como una respuesta impulsional lineal cronovisible (variable con el tiempo), de forma que si a la entrada del canal se tiene una señal $z(t)$, a la salida del canal se obtendrá una señal $w(t)$ cuya expresión es:

$$w(t) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t - \tau)h(t, \tau) d\tau. \quad (3.3)$$

La función de ensanchamiento de retardo a la entrada (*Input Delay-Spread Function*) es la función que modela la respuesta del canal radio frente a un impulso que fue generado τ segundos antes. Debido a la dificultad de trabajar en el dominio continuo, esta función se discretiza en intervalos de $\Delta\tau$, lo cual indica que el canal radio se puede entender como un filtro FIR (*Finite Impulse Response*).

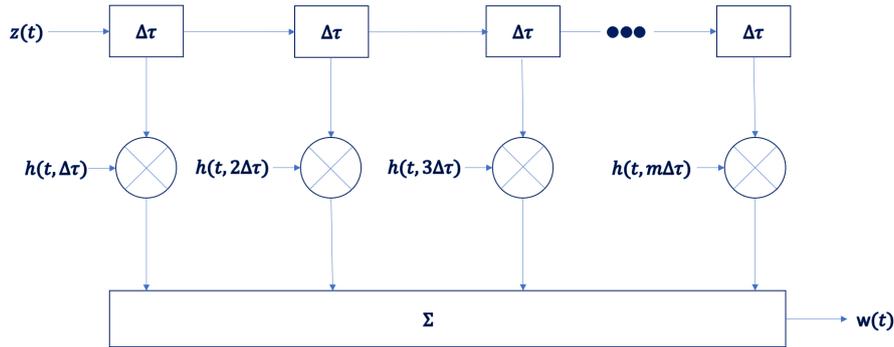


Figura 3.2: Modelo circuital de la respuesta impulsional del canal.

De este modo, conviene expresar la salida del canal en su forma discreta, siendo la señal recibida la superposición temporal de réplicas de la señal transmitida:

$$w(t) = \Delta\tau \sum_{m=1}^n z(t - m\Delta\tau)h(t, m\Delta\tau). \quad (3.4)$$

En segundo lugar, se tiene la función en el dominio de la frecuencia, la cual se puede explicar como la función dual de la respuesta impulsional. Por ello, de forma análoga a la descripción ya realizada para el dominio temporal se muestran las funciones de salida del canal en su forma continua y discreta, respectivamente:

$$W(f) = \int_{-\infty}^{\infty} Z(f - \nu)H(f - \nu, \nu) d\nu, \quad (3.5)$$

$$W(f) = \Delta\nu \sum_{m=1}^n Z(f - m\Delta\nu)H(f - m\Delta\nu, m\Delta\nu). \quad (3.6)$$

En el dominio frecuencial, la función homóloga a $h(t, \tau)$ es $H(f, \nu)$ y se denomina función de ensanchamiento *doppler-spread* a la salida (*Output Doppler-Spread Function*), donde el parámetro ν cuantifica el ensanchamiento producido por el efecto *doppler* que sufre la señal.

La tercera función que caracteriza el canal es la función de transferencia cronovisible (*Time-Variant Transfer Function*), la cual relaciona la señal temporal a la salida ($w(t)$) con el espectro a la señal de entrada ($Z(f)$). Esta función se puede obtener como la transformada de Fourier de la

función de ensanchamiento de retardo a la entrada o como la transformada inversa de Fourier de la función de ensanchamiento *doppler-spread* a la salida:

$$T(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} H(f, \nu) e^{j2\pi f\nu} d\nu. \quad (3.7)$$

La cuarta y última función, $S(\tau, \nu)$ es la función de ensanchamiento *doppler/retardo* (*Doppler/Delay Spread Function*), la cual representa de forma conjunta el efecto dispersivo de estos dos fenómenos:

$$S(\tau, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) e^{-j2\pi\nu t} d\nu. \quad (3.8)$$

3.4. Métricas para el análisis de la dispersión temporal

A partir de la definición de las funciones del canal, se pueden extraer las métricas necesarias para realizar una caracterización precisa del canal. En concreto, la más interesante es la función de *scattering* [3], la cual informa del efecto dispersivo en tiempo y frecuencia.

Si se realiza la integral de la función de *scattering* en el dominio frecuencial, se obtiene el PDP. Este representa el perfil de potencia de la señal en función únicamente del parámetro de retardo τ . De forma aproximada, el PDP se puede calcular como la esperanza del valor absoluto de la función IDSF al cuadrado, de forma que [3]:

$$PDP(\tau) \equiv P_h(\tau) = \int_0^{\infty} S(\tau, \nu) d\nu \approx E_t \left\{ |h(t, \tau)|^2 \right\}. \quad (3.9)$$

El PDP es un estadístico de gran utilidad porque permite obtener los parámetros que caracterizan la dispersión temporal del canal. En este sentido, se definen los momentos de primer y segundo orden del PDP, respectivamente: el retardo medio y el ensanchamiento de retardo medio o *delay spread* [3]:

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\infty} \tau P_h(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} P_h(\tau) d\tau}, \quad (3.10)$$

$$\sigma_{\tau} = \tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (\tau - \bar{\tau})^2 P_h(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} P_h(\tau) d\tau}}. \quad (3.11)$$

Respecto al dominio de la frecuencia, el parámetro que describe el comportamiento del canal es el ancho de banda de coherencia (B_C). Este valor se obtiene a partir de la función de autocorrelación R_T , la cual se puede obtener como la transformada de Fourier del PDP e indica el grado de correlación que presentan las componentes en recepción. Su forma característica se presenta en la Figura 3.3.

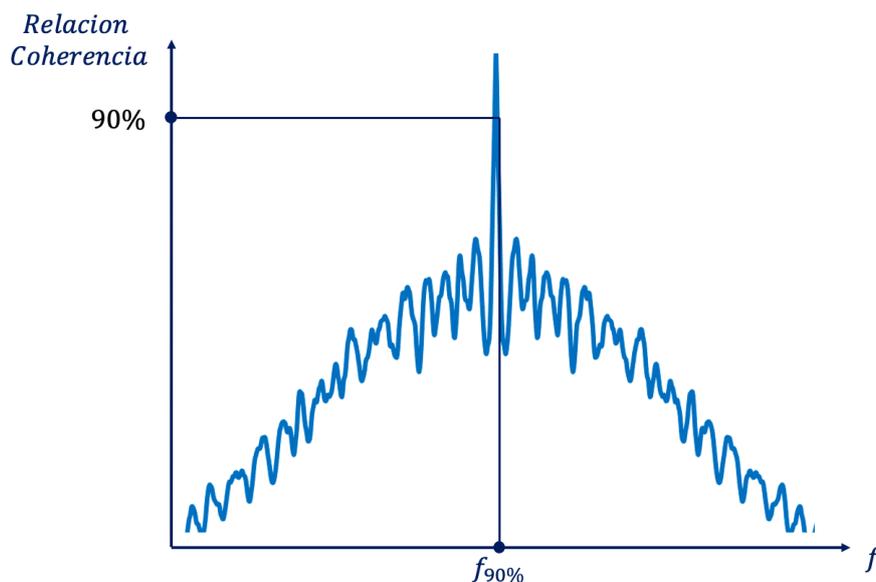


Figura 3.3: Función de autocorrelación del canal.

Como se observa el eje de abscisas se corresponde con la frecuencia, por lo que dado el grado de correlación que se busque obtener, α , perteneciendo este al intervalo $[0, 1]$, se puede calcular el ancho de banda de coherencia como el valor Ω que cumpla la condición $R(\Omega) \leq \alpha$. Esto se ejemplifica en la figura para un grado de correlación del 90 %.

3.5. Análisis del PDP y clusterización

En este apartado se ha decidido exponer el desarrollo llevado a cabo para realizar la clusterización de los APDP obtenidos. El propósito de cualquier herramienta de clusterización es evaluar las relaciones entre patrones con el fin de organizarlos en grupos (clústeres), de modo que los valores de un mismo clúster comparten similitudes entre sí y se diferencian del resto de valores de otros clústeres [6].

En la literatura se pueden encontrar distintos algoritmos de clusterización, tal y como se explica en [7]. En este TFG, se ha decidido implementar el algoritmo de clusterización por tiempo y amplitud descrito en [8], también denominado algoritmo de Corrigan en [7]. De forma breve, se podría resumir que este algoritmo realiza una primera separación temporal de las muestras de acuerdo con un valor umbral definido por el usuario. Posteriormente, a partir de los primeros clústeres definidos, el algoritmo realiza una segunda división en subclústeres de acuerdo con la intensidad de dichas contribuciones. Este funcionamiento se puede entender mediante el diagrama de flujo de la Figura 3.4.

Como se ha dicho, el valor umbral para la definición de clústeres temporales se decide de forma empírica. Resulta necesario por tanto escoger un valor unánime para todas las bandas que busque un compromiso de calidad y cantidad de clústeres, ya que demasiados clústeres indicaría una pobre agrupación y pocos clústeres, una definición demasiado amplia. Por ello, se ha decidido ajustar el número de clústeres de acuerdo con el criterio del diámetro del área de contribuciones similares.

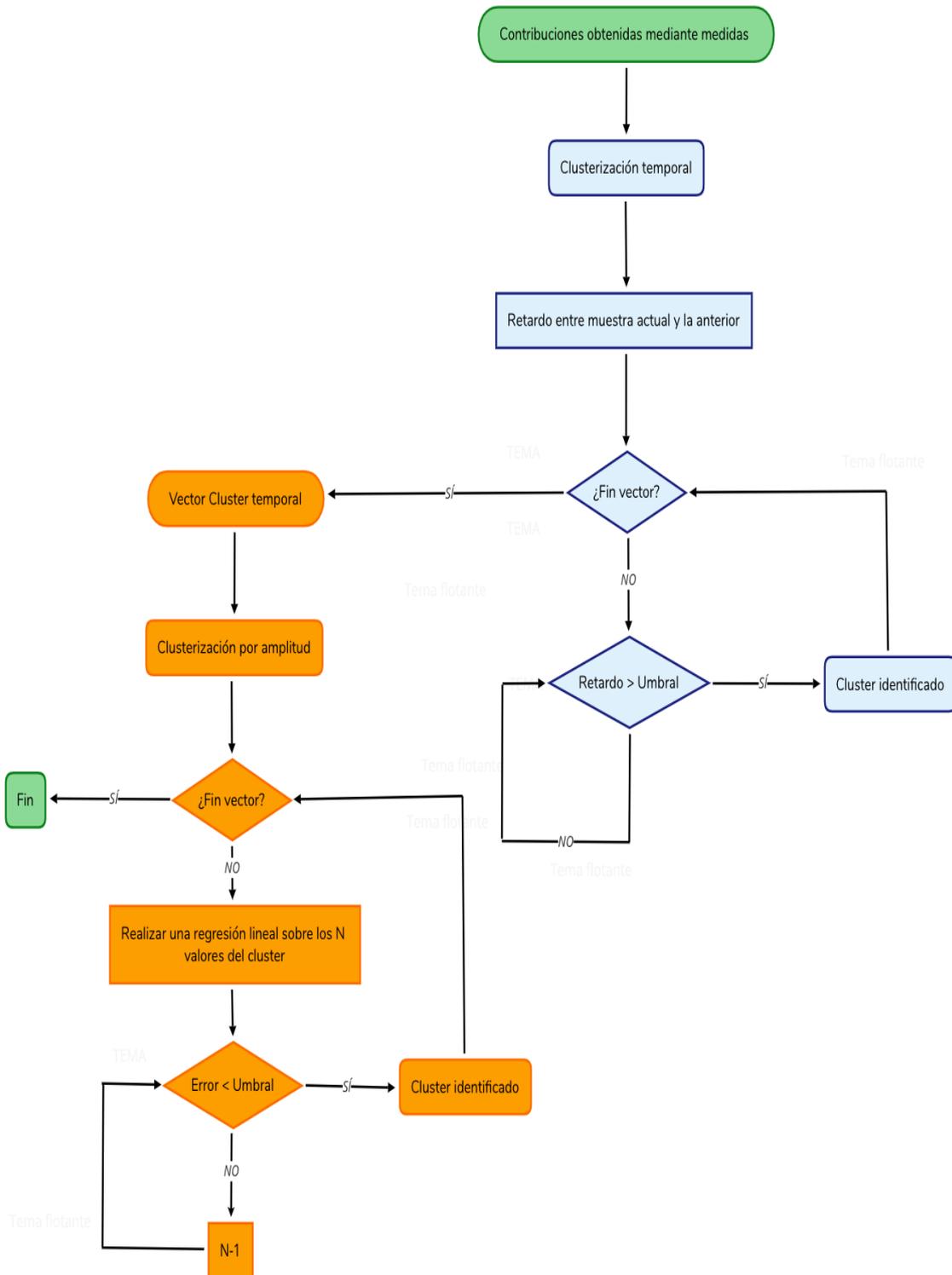


Figura 3.4: Diagrama de flujo del algoritmo de clusterización.

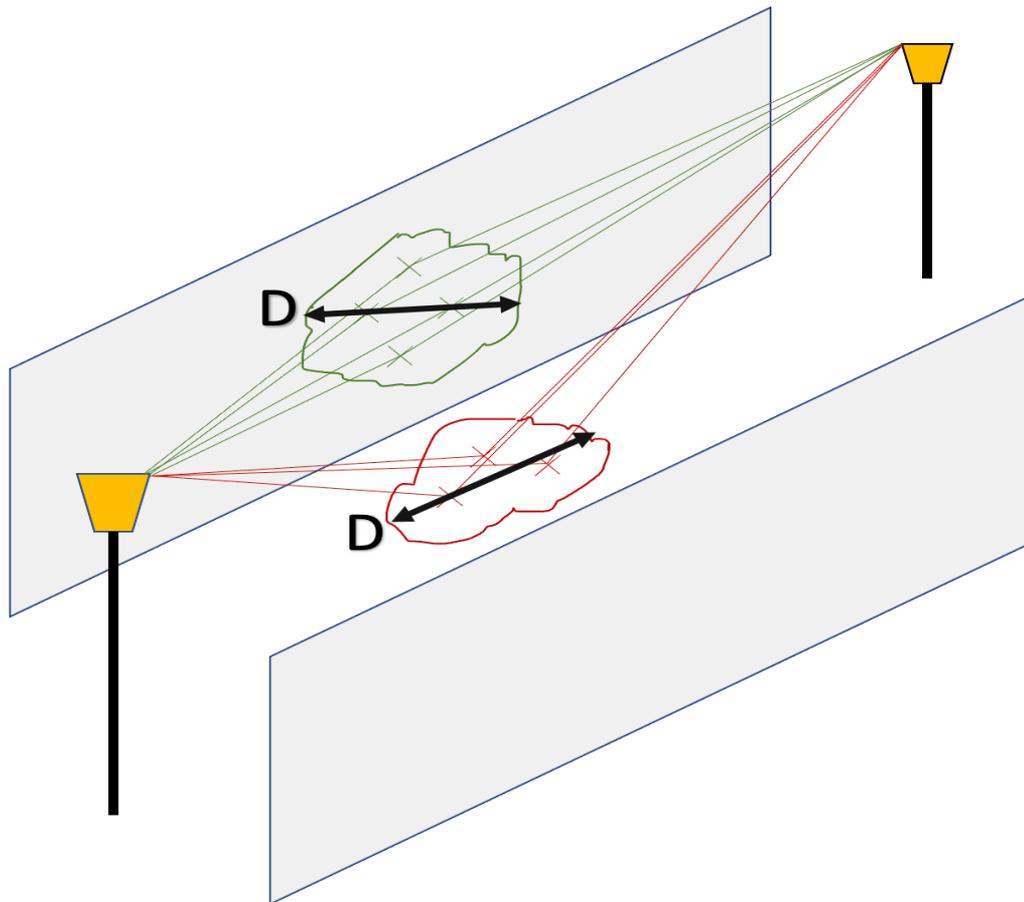


Figura 3.5: Esquema del criterio de definición de clústeres.

Como se puede apreciar en la Figura 3.5, se tienen dos antenas transmitiendo y recibiendo contribuciones multicamino. También se observan dos paredes y el suelo. En la pared más alejada, existe un clúster (representado en color verde) y en el suelo otro (representado en color rojo). Mediante esta representación, se pretende justificar que dichos clústeres deben ser diferentes en el análisis, por lo que se debe definir una área de clúster, tal y como se ve en la figura.

Teniendo esto en cuenta, se debe decidir cuál será ese diámetro que defina cada clúster temporal, por lo que se ha creído conveniente que dada la banda de frecuencias de análisis esta dimensión debe ser del orden de decenas de longitudes de onda (λ). Por ello, se define que el umbral temporal para la definición de clústeres se obtenga de acuerdo a la ecuación (3.12):

$$\Delta\tau = \frac{k\lambda}{c_o} = \frac{k}{f_c}, \quad (3.12)$$

donde se observa que el umbral quedará definido por la inversa frecuencia central (f_c) de la banda de trabajo multiplicada por un parámetro k . Este parámetro será el que influya en el número de clústeres temporales. De hecho, a mayor k , el umbral requerido será mayor y por tanto el número de clústeres será menor y viceversa.

A continuación, en la Tabla 3.1 se muestran un resumen de los parámetros que se tienen en cuenta a la hora de definir el umbral temporal. En la primera fila, se tiene la frecuencia central (f_c) de cada una de las bandas. En las últimas dos filas, se incluye el valor umbral en ns y como función del tiempo de muestreo (T_m), respectivamente.

Banda	B1		B2		B3		B4	
f_c (GHz)	26.25		28.5		32.6		38.5	
k	20	50	20	50	20	50	20	50
TH_T (en ns)	0.7619	1.9048	0.7018	1.7544	0.6135	1.5337	0.5195	1.2987
TH_T (en T_m)	1.9048	4.7619	1.4035	3.5088	0.9816	2.454	1.5584	3.8961

Tabla 3.1: Valores mínimos y máximos del umbral temporal para la clusterización en las bandas de análisis.

Para ilustrar el contenido de la tabla anterior se ha decidido escoger de forma aleatoria un APDP de la banda B1 en situación LOS (posición 6). En las Figuras 3.6 y 3.7, se observa en las gráficas superiores el APDP original medido y en las dos gráficas inferiores, la clusterización para los valores $k = 20$ y $k = 50$.

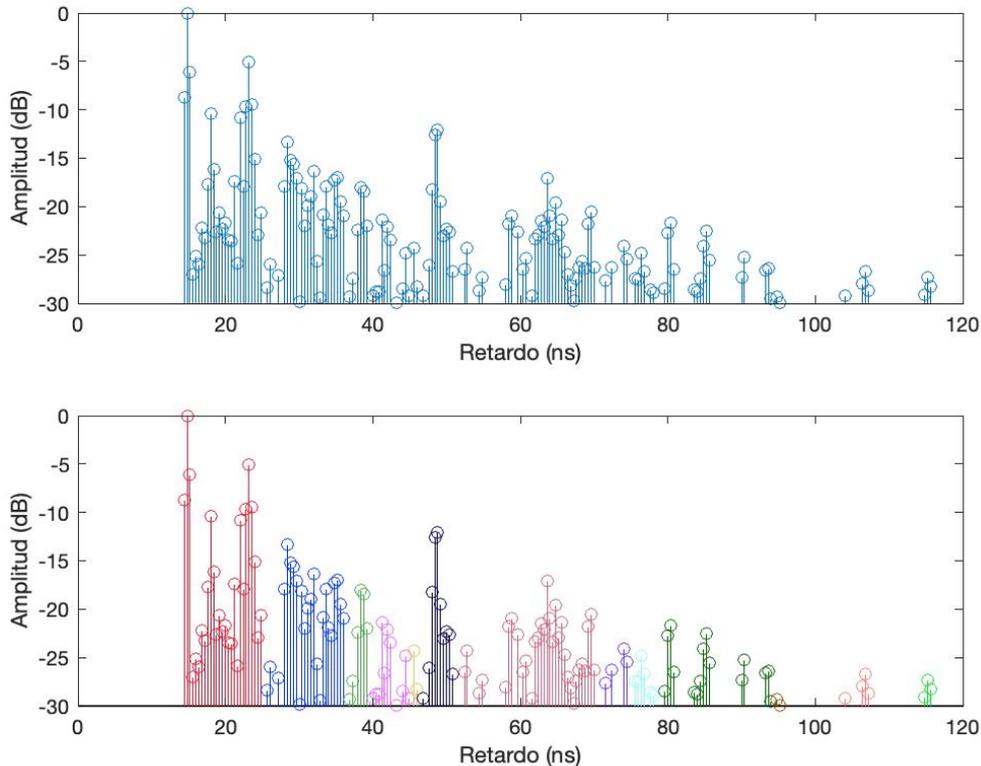


Figura 3.6: Clusterización del APDP de la posición 6 de la banda B1 para un valor de $k = 20$.

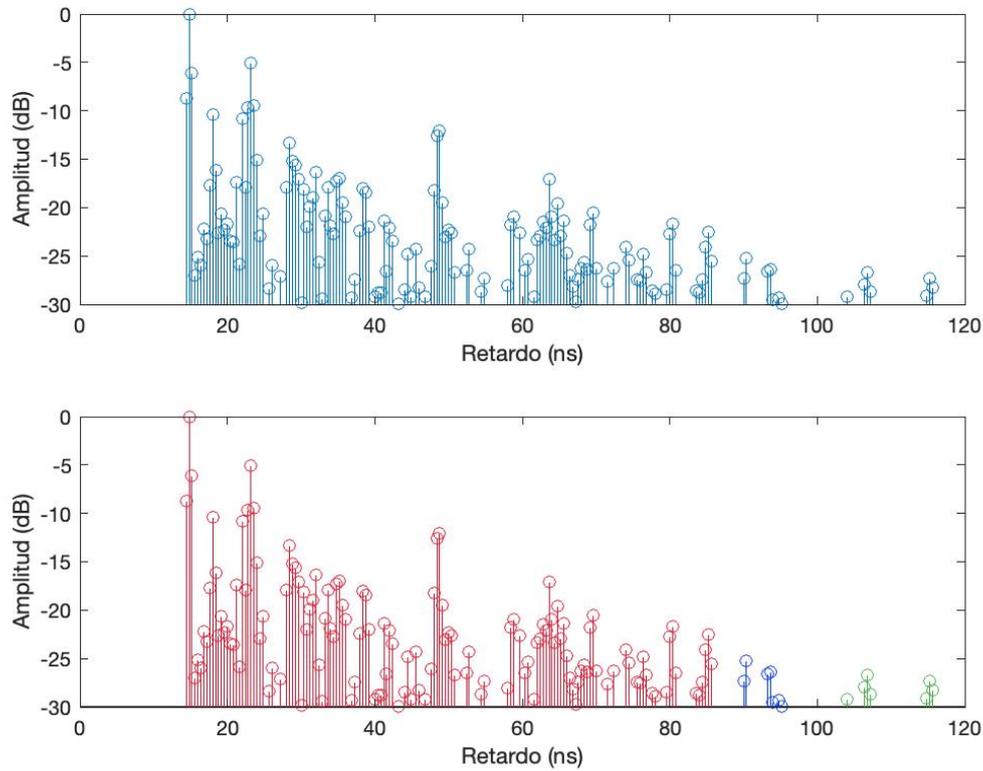


Figura 3.7: Clusterización del APDP de la posición 6 de la banda B1 para un valor de $k = 50$.

Las Figuras 3.6 y 3.7 presentan una gran diferencia de clústeres, pues en la primera el número de clústeres es 13, mientras que en la segunda es de tan sólo 3. Consecuentemente, se ha decidido adoptar una solución de compromiso entre los valores extremos y, atendiendo a los resultados dispuestos en la Tabla 3.1, se tomará como umbral temporal tres veces el tiempo de muestreo: $TH_T = 3 \times T_M$. El resultado de esta decisión se puede observar en la Figura 3.8, siendo 8 el número de clústeres.

En cuanto al umbral que definiría los clústeres por amplitud se decidió adoptar el valor indicado en [8], por considerarlo adecuado para la campaña de medidas que se analizó.

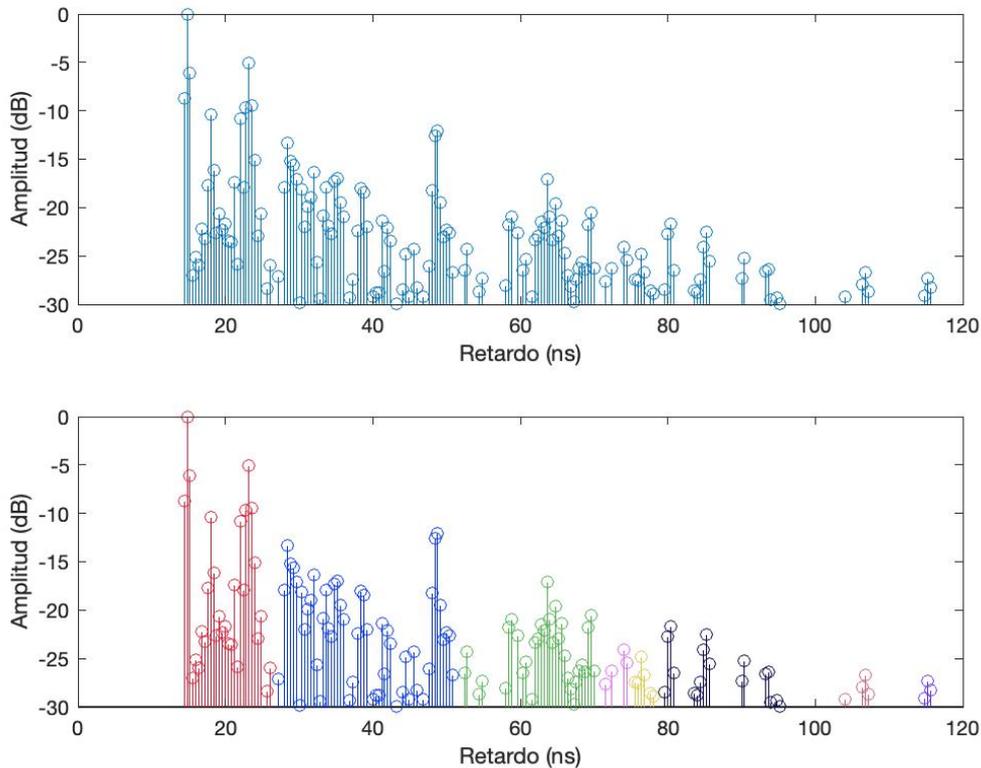


Figura 3.8: Clusterización del APDP de la posición 6 de la banda B1 con el umbral temporal escogido.

3.6. Modelado del canal: modelo Saleh-Valenzuela

La motivación de realizar una clusterización del perfil de retardo de potencia reside en conseguir definir canales de acuerdo a un modelo de propagación. De entre los distintos que se pueden hallar en la literatura [9] [10], se ha decidido escoger el modelo de Saleh-Valenzuela (SV) [2], por ser el más adecuado para escenarios de interior.

El modelo SV se basa en la existencia de clústeres de contribuciones multicamino. Se estima que dentro de cada grupo, dichas contribuciones multicamino llegan al receptor con un retardo que sigue una distribución de *Poisson* de parámetro $\frac{1}{\lambda}$ y con una potencia que se ajusta a un modelo exponencial de la forma $A_i \times e^{-\frac{\tau}{\tau_i}}$, donde i indica el número de clúster. Además, el modelo asume también que los clústeres llegan al receptor con un retardo que sigue una distribución de *Poisson* de parámetro $\frac{1}{\lambda}$ y con una potencia que se ajusta a un modelo exponencial de la forma $A \times e^{-\frac{\tau}{T}}$. Esto se puede observar en la Figura 3.9.

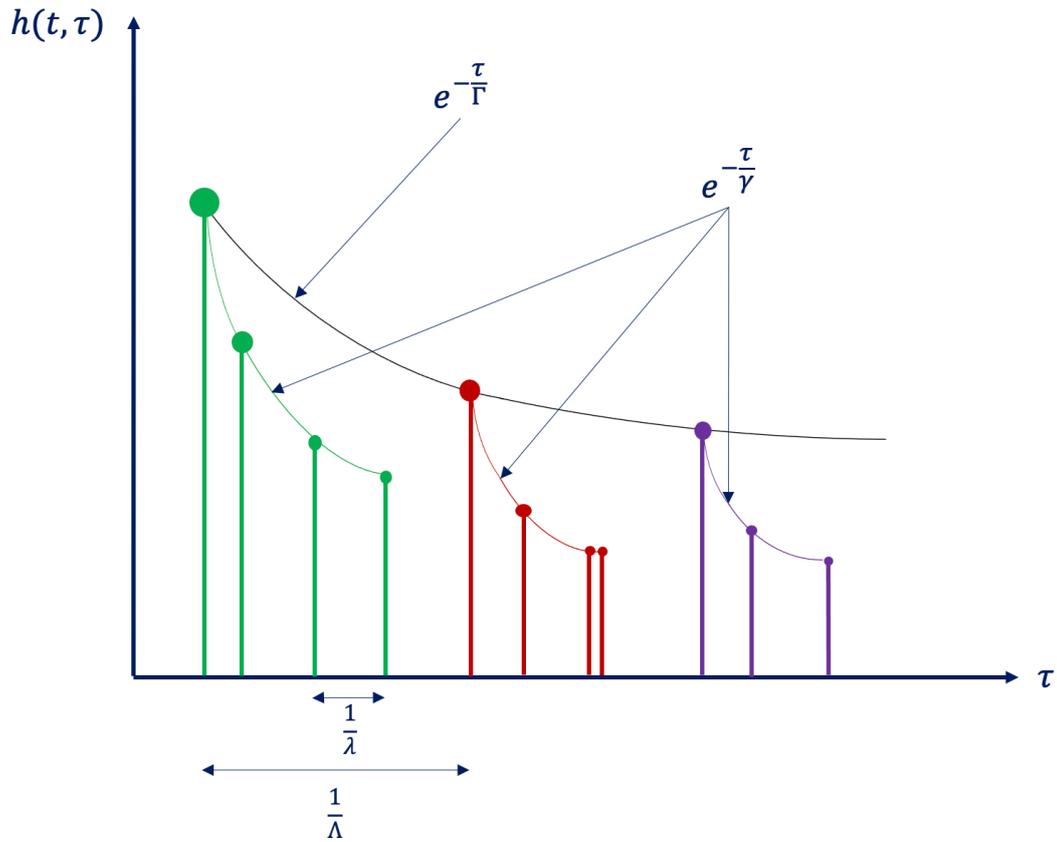


Figura 3.9: Esquema del modelo Saleh-Valenzuela.

Además, mediante la Figura 3.9, se pretenden introducir los cuatro parámetros clave del modelo, sobre los cuales se realizará un extenso análisis en la sección 5 del TFG:

1. $\gamma \equiv$ factor de decaimiento de la amplitud de las contribuciones del clúster.
2. $\Gamma \equiv$ factor de decaimiento de la amplitud de los clústeres.
3. $\lambda \equiv$ tasa de llegada de las contribuciones multicamino dentro de un clúster.
4. $\Lambda \equiv$ tasa de llegada de los clústeres.

Como se desprende de la Figura 3.9 y, de acuerdo con lo descrito en [2], el decaimiento de las contribuciones multicamino de un clúster siempre será mayor que el decaimiento del PDP global, lo que implica que $\Gamma > \gamma$. De igual forma, la llegada de las contribuciones para un mismo clúster, siempre será menor que la tasa de llegada de los múltiples clústeres, por lo que $\lambda > \Lambda$.

Capítulo 4

DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS

4.1. Breve descripción de la sonda de medidas

En esta sección de la memoria se va a presentar la campaña de medidas analizada para la caracterización teórica del canal desarrollada anteriormente. Esta campaña de medidas fue usada en [11] y también en el Trabajo Fin de Grado de D. Raúl Cervera Marín [12].

Para la realización de las medidas de dicha campaña se ha empleado una antena transmisora y receptora, cuyo diagrama de radiación se puede considerar omnidireccional en banda ultra ancha. El transmisor se mantiene fijo durante la realización de las medidas para cada una de las distintas posiciones. Por otra parte, la antena receptora se encuentra situada siempre en la misma posición sobre un *array* uniforme de N filas y N columnas, separadas una distancia d , la cual depende de la banda de medición y tiene que ser menor a $\frac{\lambda_0}{2}$, siendo λ_0 la longitud de onda de la frecuencia central de la banda. Además, se ha usado un *Vector Analyzer Adapter (VNA)*, para medir el parámetro $S_{21}(f)$ en frecuencia, a partir del cual se obtendrán todas las métricas correspondientes.

Debido a la distancia entre el transmisor y el *VNA*, véase la Figura 4.2, con el fin de evitar las pérdidas derivadas del uso de cable coaxial, se ha decidido usar enlace de fibra óptica, minimizando así las pérdidas. Para ello, se han usado un conversor electroóptico y su homólogo, un conversor óptico-eléctrico para trasladar la señal desde el puerto 1 del *VNA* hasta el transmisor.

Finalmente, con el fin de asegurar la estacionariedad del canal que se exige, esta campaña de medidas se realizó durante la noche asegurando la inexistencia de movimientos inusuales.

4.2. Entorno de propagación

El entorno donde se ha realizado la campaña de medidas es la sala de becarios del Grupo de Radiación Electromagnética (GRE), perteneciente al ITEAM situado en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Esta sala cumple con los requisitos para considerarse como un entorno de oficina, pues está amueblada con sillas, mesas y ordenadores, tal y como se puede apreciar en la Figura 4.1. Por otra parte cabe destacar que el material de construcción del suelo y paredes es el pladur, mientras que el techo se hizo con placas metálicas.

4.3. Configuración de la campaña de medidas

A continuación, se procede a explicar cómo se ha configurado los equipos para realizar la campaña de medidas. En concreto, se han utilizado 14 posiciones para el transmisor, 10 de ellas con visión directa (*LOS*, por sus siglas en inglés) y 4 de ellas sin visión directa, (*OLOS*, por sus siglas en inglés), lo cual se ha conseguido colocando elementos delante del transmisor, tales como pantallas de ordenador. En la Figura 4.3, se pueden observar dichas posiciones, mientras que en la Figura 4.4 se muestra un ejemplo de posición *LOS* y *OLOS*.

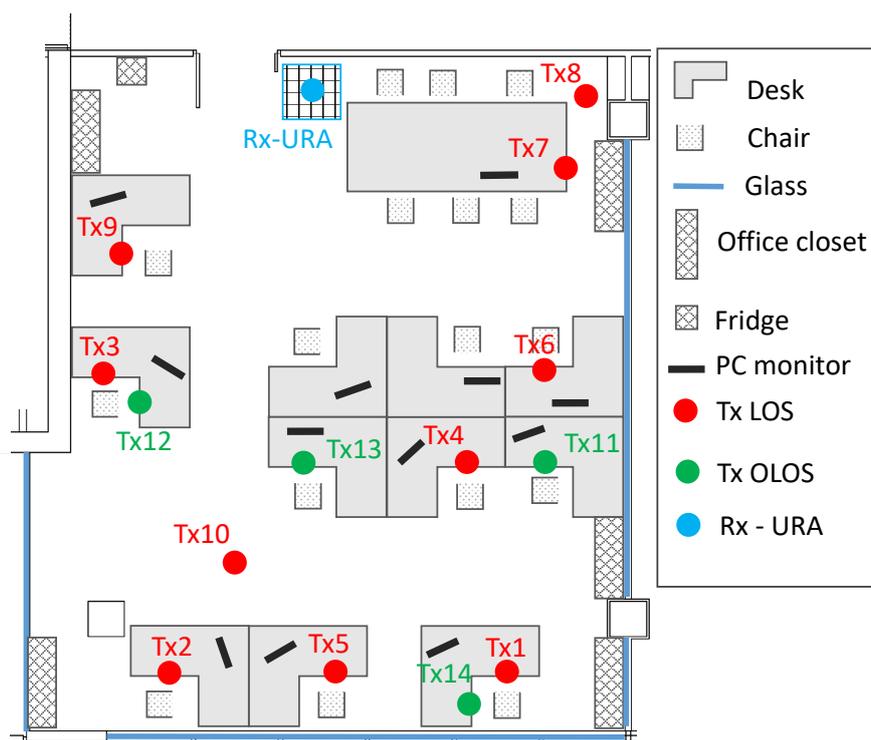


Figura 4.3: Distribución de las posiciones de los transmisores y del receptor para las medidas realizadas. Fuente: [11].

Resulta necesario añadir que las antenas no están a la misma altura, sino que el transmisor se encuentra más elevado, siendo su altura de 1.442 metros sobre el suelo frente a la del receptor que se sitúa sobre los 0.9 m. Además, también será de utilidad describir las distancias entre transmisor y receptor para realizar posteriores análisis, tal y como se ve en la Tabla 4.1.

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
7.55	7.07	4.83	4.96	6.87	4.32	3.81	4.48	2.58	5.85	5.38	4.62	4.20	8.19

Tabla 4.1: Distancias entre el transmisor y el receptor en metros.



Figura 4.4: Ejemplo de posición en LOS (izquierda) y OLOS (derecha). Fuente: [11].

Respecto a dichas distancias, estas han sido medidas mediante un láser. Las 10 primeras ($T1 - T10$) corresponden a las medidas en visión directa (LOS), mientras que las cuatro últimas ($T11 - T14$) son las distancias de las posiciones de OLOS.

Cuando se llevó a cabo la campaña de medidas, se decidió adoptar la configuración de la Tabla 4.2. Específicamente, se realizó una medición para todo el ancho de banda entre 25 GHz y 40 GHz para cada una de las 14 posiciones comentadas con anterioridad.

Número de puntos en frecuencia	<i>Span</i>	Dimensiones del receptor	Separación entre posiciones	Máximo retardo sin ambigüedad
8192	15 GHz	12x12	3.04 mm	546.07 ns

Tabla 4.2: Configuración de las medidas.

Posteriormente, de cara al desarrollo de este TFG, se han seleccionado submuestras de las capturadas en todo el espectro de acuerdo con los anchos de banda descritos en la Tabla 1.1. Así pues, el número de puntos en frecuencia que se ha usado ha sido 1365, 1092, 874 y 1639 para cada banda, respectivamente.

Capítulo 5

ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS

5.1. Introducción

En esta sección se realizará un detallado estudio de las medidas descritas con anterioridad. En primer lugar, se analizará la dispersión temporal del canal, donde a partir de la información que otorga el PDP se extraerán los dos estadísticos clave: *delay spread* y ancho de banda de coherencia. En la segunda parte, se realizará el análisis de la clusterización del PDP, en el cual a partir del algoritmo que se ha desarrollado, se podrán obtener los cuatro estadísticos del modelo de Saleh-Valenzuela.

5.2. *Average Power Delay Profile*

El perfil de retardo de potencia (PDP) proporciona la intensidad de las contribuciones multi-camino de acuerdo con el retardo temporal con que estas llegan al receptor. Así pues, recuperando la expresión de la ecuación (3.9), se observa que debido a la disposición de receptor, habrá que realizar un promediado de la respuesta impulsional del canal al cuadrado para las $N \times N$ posiciones. Esto es lo que se denomina *Average Power Delay Profile* (APDP), calculándose del siguiente modo:

$$APDP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |h_i(t, \tau)|^2. \quad (5.1)$$

Por otro lado, tal y como se ha expuesto con anterioridad, existen dos situaciones distintas dependiendo de si el transmisor y el receptor se encuentran en visión directa (LOS) o no (OLOS). En la primera situación, la contribución principal será la primera en llegar al receptor, puesto que recorre la distancia más corta entre los dos, y por tanto, deberá ser la que mayor amplitud presente. Sin embargo, es posible que, debido a múltiples reflexiones con objetos, contribuciones que lleguen con mayores retardos se sumen en fase y alcancen una amplitud mayor que la de la contribución principal.

Por el contrario, en la segunda situación (OLOS), lo más probable es que, debido a la obstaculización entre transmisor y receptor, la primera contribución aparezca con una amplitud menor, debido al hecho que al atravesar el obstáculo que impide la visión directa introduce pérdidas en dicha contribución.

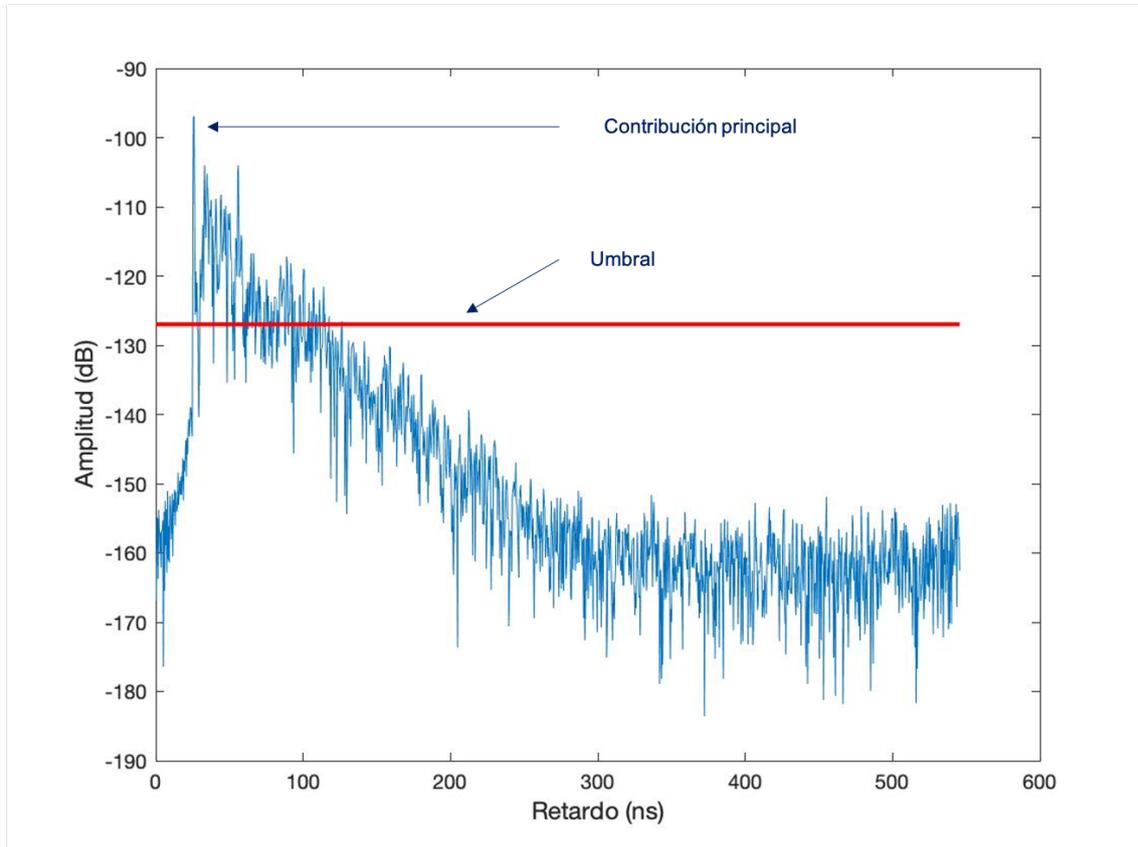


Figura 5.1: LOS APDP en dB de la banda B1 en la posición 1.

En la Figura 5.1 se puede apreciar lo que se ha comentado con anterioridad sobre la contribución principal para LOS. Además, resulta oportuno mencionar que, para la obtención de todas las métricas y parámetros que se van a desarrollar a continuación, ha sido necesario establecer un nivel de ruido respecto de la contribución principal. Como se puede ver en la Figura 5.1, se define que todas las contribuciones que hayan llegado al receptor con más de 30 dB de diferencia respecto a la contribución principal serán tratadas como ruido.

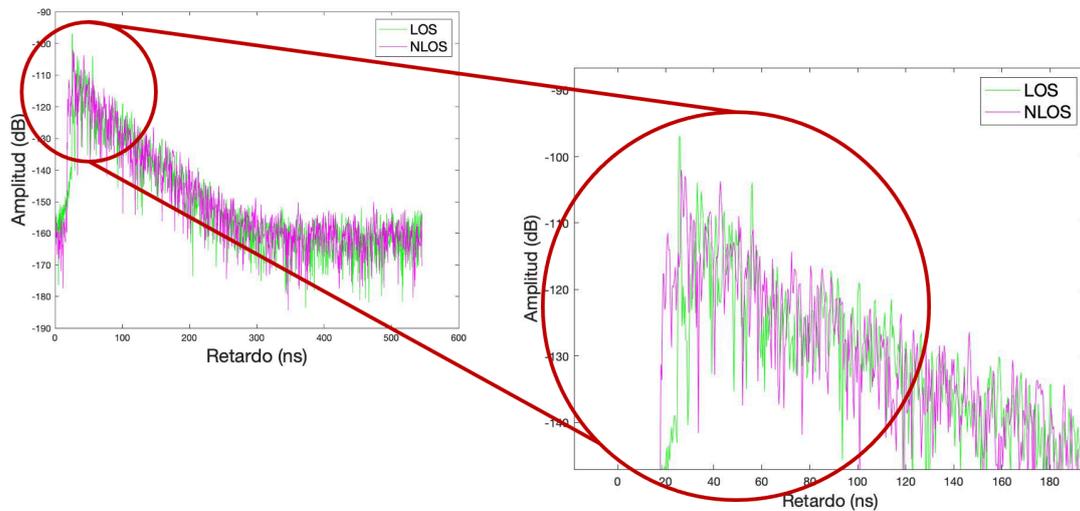


Figura 5.2: Comparación LOS y OLOS para los APDP en dB de las posiciones 1 y 11 de la banda B1.

Por último, se ha decidido mostrar una comparación entre el APDP en LOS para la posición 1 y el APDP en OLOS para la posición 11 en la Figura 5.2. Como se puede observar, el nivel de la contribución principal disminuye en condiciones de OLOS, por los motivos explicados con anterioridad.

5.3. Dispersión temporal

Tras esta breve explicación sobre el tratamiento realizado con el PDP, se pretende realizar el análisis del parámetro que permite definir el comportamiento de la dispersión temporal en el canal radioeléctrico. Es lo que se conoce en la literatura como *delay spread*, σ_{rms} , y representa el momento de segundo orden del PDP.

Para el cálculo de los estadísticos y gráficas del *delay spread* se han empleado cada uno de los PDP medidos, es decir, no se ha trabajado con el APDP para así obtener un mayor muestreo del canal en cada una de las bandas.

5.3.1. Banda B1 (25 a 27.5 GHz)

En las sucesivas secciones, se van a presentar las funciones de distribución (*CDF*, por sus siglas en inglés) del *delay spread* así como estadísticos que permiten definir el comportamiento del canal en las 4 bandas del análisis.

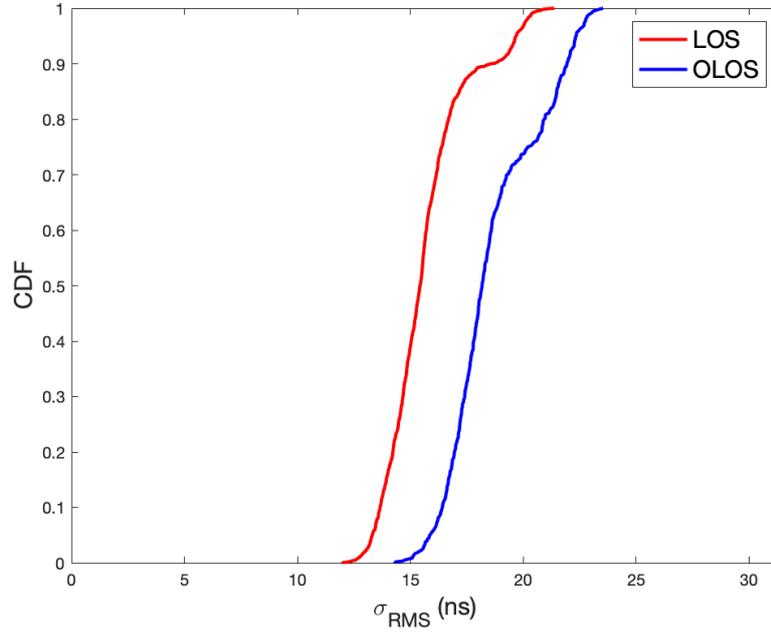


Figura 5.3: CDF de σ_{rms} en LOS y OLOS para la banda B1.

De esta forma, se puede observar en la Figura 5.3 las funciones de distribución para ambas situaciones de LOS y OLOS. De hecho, se observa que se cumple con lo esperado pues el σ_{rms} será mayor en el caso de OLOS que en el caso de LOS, puesto que la contribución con mayor amplitud llegará con más retardo que en el caso de visión directa.

De igual forma, en la Tabla 5.1 se encuentran los estadísticos de media, desviación estándar (*STD*), y los valores máximos y mínimos que se alcanzan, los cuales también se pueden apreciar en la Figura 5.3.

	Media (ns)	STD (ns)	Mínimo (ns)	Máximo (ns)
LOS	15.66	1.78	12.00	21.37
OLOS	18.67	2.05	14.32	23.53

Tabla 5.1: Estadísticos del *delay spread* para la banda B1.

Por otra parte, se ha comprobado que existe una relación entre el *delay spread* y la distancia transmisor-receptor, la cual es de la forma:

$$\sigma_{rms} = a \times d_{TX-RX} + b, \quad (5.2)$$

donde d_{TX-RX} indica la distancia entre los equipos y a y b serían las constantes de la relación lineal con el *delay spread*.

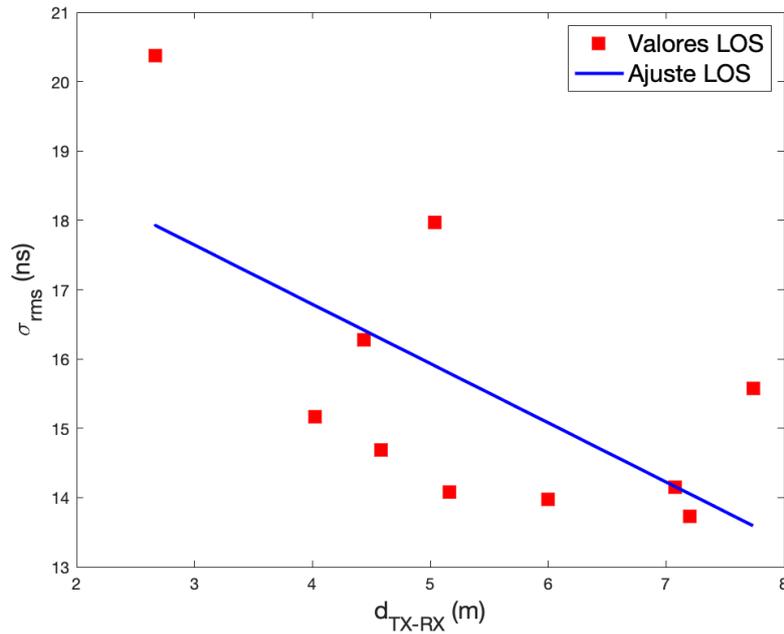


Figura 5.4: Relación entre la distancia y σ_{rms} en LOS para la banda B1.

De hecho, en la Figura 5.4 se puede apreciar que dicha relación es lineal decreciente, esto es, que a mayor distancia el canal es menos dispersivo puesto que σ_{rms} es menor. A continuación, en la Tabla 5.2 se presentan los parámetros a y b obtenidos de la regresión lineal, así como sus intervalos de confianza, los cuales servirán para realizar una posterior comparación con las otras bandas.

Parámetro	Valor obtenido	Intervalo de confianza (95 %)	R^2
a	-0.85	(-1.68, -0.03)	0.42
b	20.21	(15.58, 24.83)	

Tabla 5.2: Parámetros del ajuste lineal entre d_{TX-RX} y σ_{rms} para la banda B1.

5.3.2. Banda B2 (27.5 a 29.5 GHz)

Para la banda B2, se seguirá el mismo procedimiento que en la banda B1. A continuación, se muestra en la Figura 5.5 la función de distribución del *delay spread*. Como se puede entender, se trata de un hecho inusual que la curva de visión directa supere a la de no visión directa en torno al 15 % de las muestras.

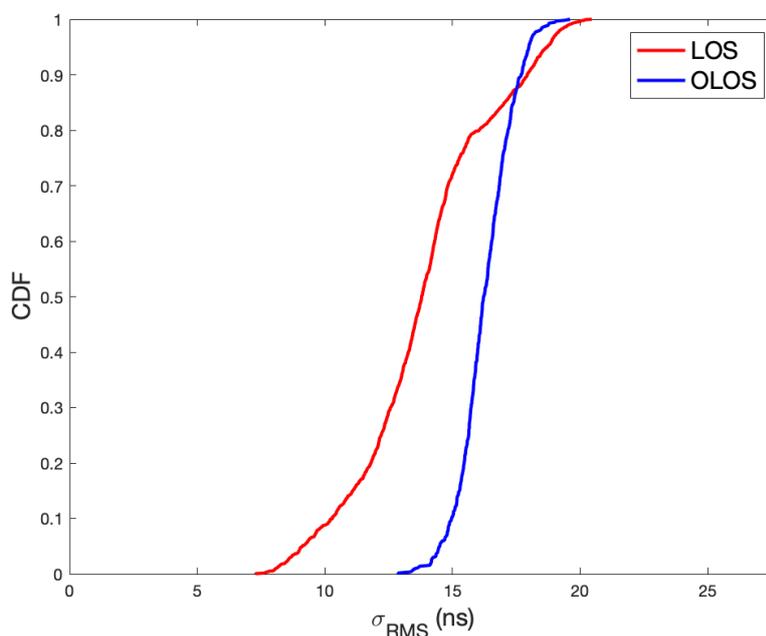


Figura 5.5: CDF de σ_{rms} en LOS y OLOS para la banda B2.

En la Tabla 5.3, aparecen los estadísticos más significativos que permiten describir la dispersión temporal en esta banda. A modo de comparación con la anterior banda, se observa un aumento de la media en visión directa, lo cual concuerda con el hecho que al aumentar la frecuencia el canal será más dispersivo.

	Media (ns)	STD (ns)	Mínimo (ns)	Máximo (ns)
LOS	13.86	2.69	7.29	20.45
OLOS	16.28	1.06	12.87	19.61

Tabla 5.3: Estadísticos del *delay spread* para la banda B2.

De igual forma que para la banda B1, en la Figura 5.6, se observa la relación entre la distancia y el *delay spread* en situación de visión directa para la banda B2. A diferencia del caso anterior, se observa que la tendencia es creciente con la distancia, si bien es cierto que la pendiente es casi plana. A continuación de la figura, se halla la Tabla 5.4, la cual contiene los parámetros que definen dicha relación creciente.

Parámetro	Valor obtenido	Intervalo de confianza (95 %)	R^2
a	0.08	(-1.42, 1.59)	0.002
b	13.40	(4.95, 21.84)	

Tabla 5.4: Parámetros del ajuste lineal entre d_{TX-RX} y σ_{rms} para la banda B2.

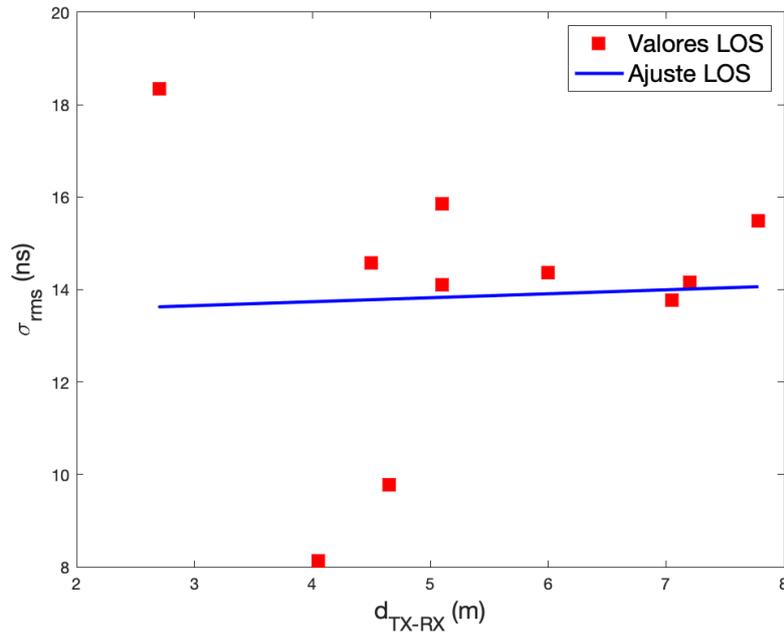


Figura 5.6: Relación entre la distancia y σ_{rms} en LOS para la banda B2.

5.3.3. Banda B3 (31.8 a 33.4 GHz)

La tercera banda recae entre los 31.8 GHz y los 33.4 GHz, más alejada de las dos anteriores, por lo que el canal aquí será más dispersivo. Esto se puede apreciar en la Figura 5.7 sobre todo en condiciones de OLOS, donde el comportamiento dispersivo del canal es más agudo.

Enlazando con lo anterior, en la Tabla 5.5, se observa cómo los valores máximos y medios en ambas condiciones aumentan respecto a las dos anteriores bandas, por los motivos expuestos con anterioridad.

	Media (ns)	STD (ns)	Mínimo (ns)	Máximo (ns)
LOS	15.50	2.74	9.46	23.66
OLOS	21.31	6.88	12.94	53.28

Tabla 5.5: Estadísticos del *delay spread* para la banda B3.

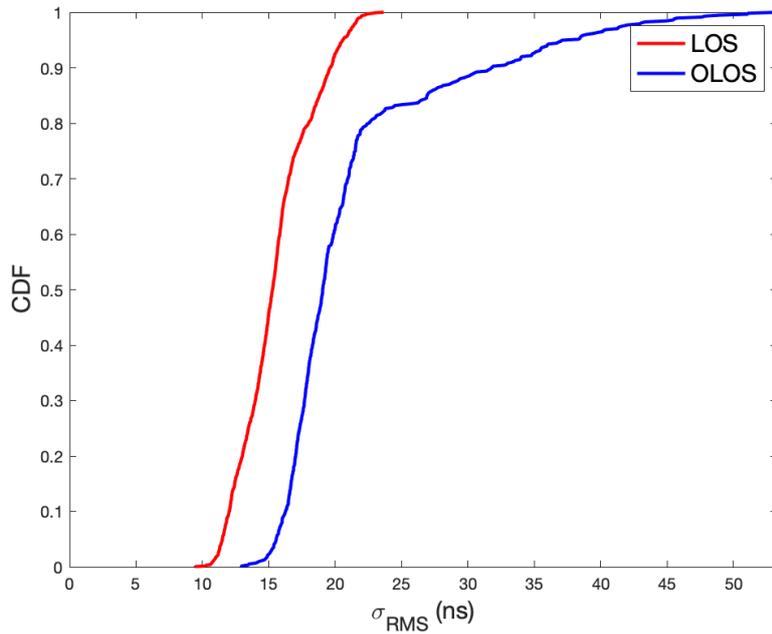


Figura 5.7: CDF de σ_{rms} en LOS y OLOS para la banda B3.

En cuanto a la relación de la distancia con el *delay spread*, se presenta a continuación los resultados obtenidos en forma de una gráfica (véase la Figura 5.8) y de una tabla (véase la Tabla 5.6) que aúna los valores de los parámetros de la regresión lineal. En este caso, al igual que para la banda B1, se obtiene el resultado esperado y la tendencia es decreciente.

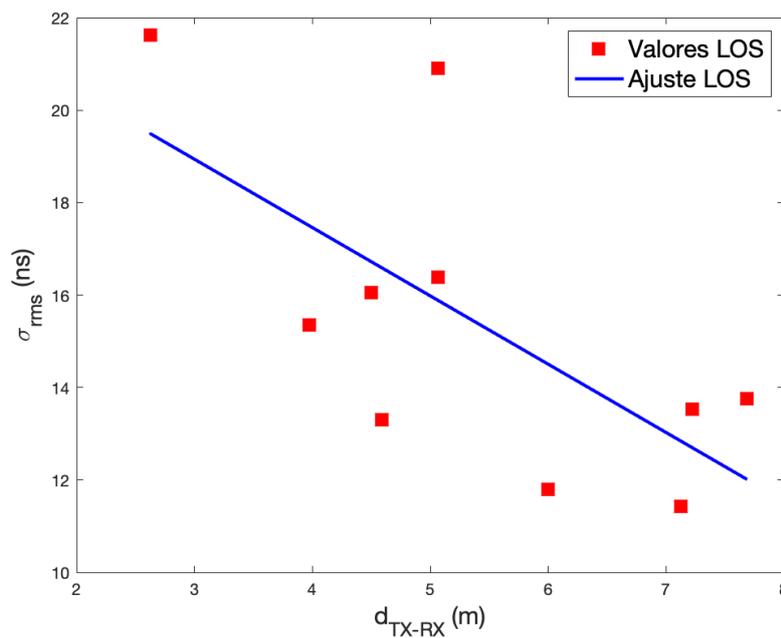


Figura 5.8: Relación entre la distancia y σ_{rms} en LOS para la banda B3.

Parámetro	Valor obtenido	Intervalo de confianza (95 %)	R^2
a	-1.48	(-2.77, -0.18)	0.46
b	23.37	(16.12, 30.62)	

Tabla 5.6: Parámetros del ajuste lineal entre d_{TX-RX} y σ_{rms} para la banda B3.

5.3.4. Banda B4 (37 a 40 GHz)

Finalmente, para la banda B4, en la Tabla 5.7 se presentan los estadísticos de la dispersión temporal y en la Figura 5.9 se tiene la *CDF*. Además, en la Figura 5.10 y la Tabla 5.8, se presentan los resultados obtenidos al comparar la distancia transmisor-receptor con el *delay spread* que presenta el canal para dichas frecuencias.

	Media (ns)	STD (ns)	Mínimo (ns)	Máximo (ns)
LOS	13.30	2.85	8.76	20.03
OLOS	28.70	17.28	11.89	73.11

Tabla 5.7: Estadísticos del *delay spread* para la banda B4.

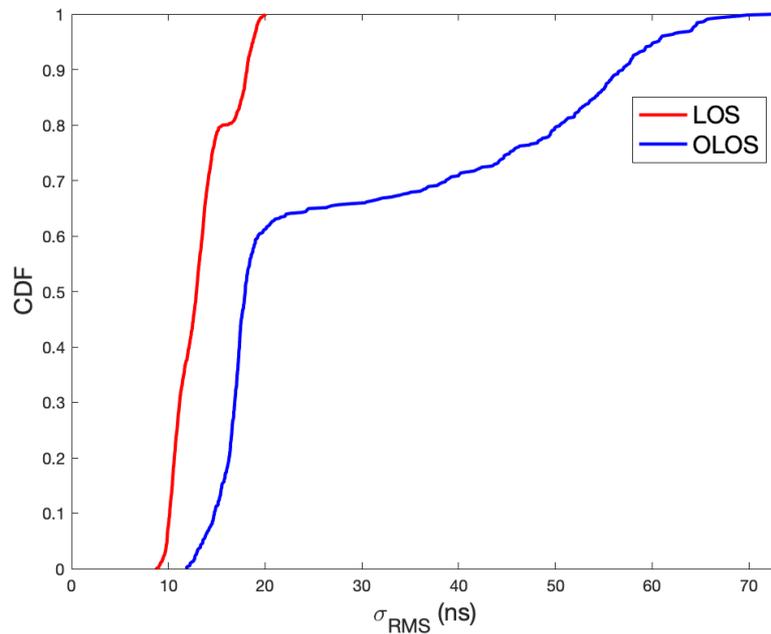


Figura 5.9: *CDF* de σ_{rms} en LOS y OLOS para la banda B4.

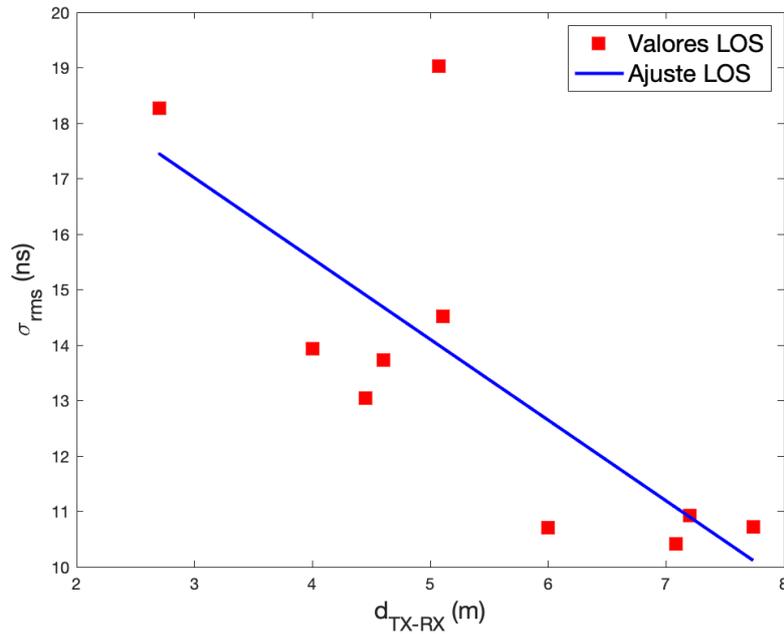


Figura 5.10: Relación entre la distancia y σ_{rms} en LOS para la banda B4.

Parámetro	Valor obtenido	Intervalo de confianza (95%)	R^2
a	-1.45	(-2.50, -0.40)	0.56
b	21.38	(15.5, 27.26)	

Tabla 5.8: Parámetros del ajuste lineal entre d_{TX-RX} y σ_{rms} para la banda B4.

5.4. Ancho de banda de coherencia

5.4.1. Modelo

Retomando lo expuesto en el capítulo 3 de aspectos teóricos, el ancho de banda de coherencia se obtiene a partir de la función de autocorrelación del PDP, cuya forma se puede observar en la Figura 3.3. Teniendo esto en cuenta, así como el procedimiento empírico para su cálculo, en este apartado se pretende presentar la relación que existe entre el *delay spread* anteriormente analizado y el ancho de banda de coherencia.

Si se realiza una búsqueda por la literatura, se pueden encontrar diversos modelos cuyo fin es encontrar el ajuste más adecuado para dicha relación. En este trabajo, se ha decidido emplear el propuesto en [11] por considerarlo el más apropiado y preciso:

$$B_{C,90\%} = \frac{\alpha}{\sigma_{rms}^\beta}. \quad (5.3)$$

Atendiendo a la relación propuesta se muestra que se va a estudiar el ancho de banda de coherencia para una relación del 90 % de coherencia. Este valor es el más empleado en la literatura porque permite suavizar el efecto de dispersión temporal, al mismo tiempo que produce el valor mínimo de ancho de banda de coherencia útil para analizar el comportamiento del entorno de medición.

5.4.2. Banda B1 (25 a 27.5 GHz)

De igual forma que en la sección anterior, se presentarán los resultados del ancho de banda de coherencia para las cuatro bandas de análisis. En primer lugar, se procederá a obtener los parámetros que definen la relación con σ_{rms} para la banda B1, la cual comprende las frecuencias entre los 25 y 27.5 GHz.

Dicho esto, en las Figuras 5.11 y 5.12 se reproduce la relación entre σ_{rms} y $B_{C,90\%}$. Como se puede observar el ajuste descrito en la ecuación (5.3) es muy preciso tanto en el caso de LOS como OLOS. Además, se ha decidido representar un histograma de las variables de *delay spread* y ancho de banda de coherencia, en los márgenes exteriores de la figura.

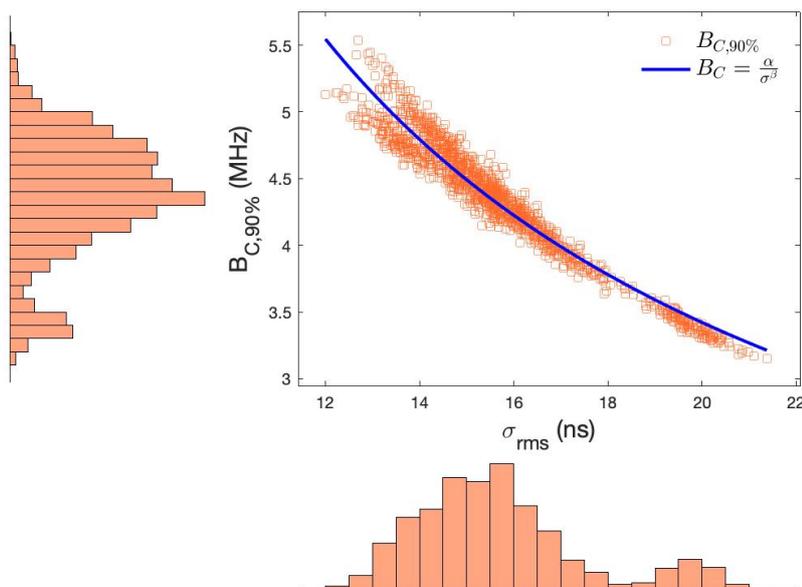


Figura 5.11: Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90 % y σ_{rms} en situación de LOS para la banda B1.

Tomando dichos histogramas, en la Figura 5.11, para el caso de la banda B1, se halla que el *delay spread* se encuentra entre los 12 y los 22 ns mientras que el ancho de banda de coherencia tiene su mínimo en torno a los 3 MHz y su máximo sobre los 5.5 MHz. Afinando aún más, se observa que la mayoría de anchos de banda de coherencia reside en torno a los 4 y 5 MHz para *delay spread* entre 15 y 16 ns.

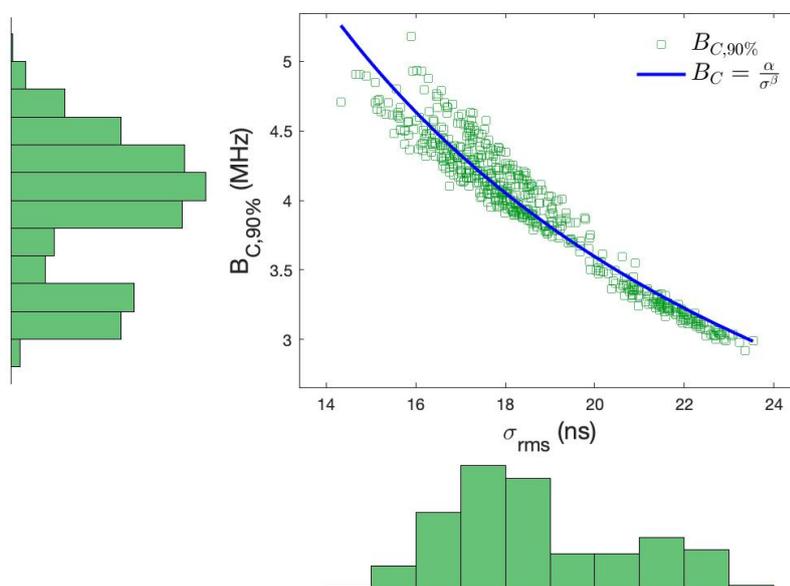


Figura 5.12: Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90 % y σ_{rms} en situación de OLOS para la banda B1.

Similarmente, en la Figura 5.12, se puede apreciar el mismo intervalo para el ancho de banda de coherencia. Sin embargo, como se ha comentado en la anterior sección, el *delay spread* es mayor, encontrándose su rango entre los 14 y los 24 ns. Específicamente, se encuentra que la mayoría de anchos de banda de coherencia rondan los 3.75 MHz y los 4.5 MHz para valores de entre 16 y 19 ns de *delay spread*, lo cual refleja que al aumentar la dispersión, el ancho de coherencia disminuye.

En la Tabla 5.9 se presentan los parámetros de la relación descrita en la ecuación (5.3), así como sus intervalos de confianza y el coeficiente de determinación (R^2), tanto para la situación de LOS como de OLOS. Si bien es cierto que el valor de β es similar en ambos casos, es apreciable que el valor de α es mucho mayor en el caso de OLOS, siendo este prácticamente el doble. Además, si se atiende al coeficiente de determinación se verifica lo que ya se había observado en las Figuras 5.11 y 5.12, por lo que la elección del modelo ha sido la adecuada.

	Parámetro	Valor obtenido	Intervalo de confianza (95 %)	R^2
LOS	α	58.17	(56.06, 60.29)	0.9359
	β	0.9458	(0.9325, 0.9591)	
OLOS	α	109.4	(100.6, 118.2)	0.9245
	β	1.14	(1.113, 1.168)	

Tabla 5.9: Parámetros del ajuste entre el ancho de banda de coherencia y el *delay spread* para la banda B1.

5.4.3. Banda B2 (27.5 a 29.5 GHz)

Para la segunda banda del análisis, en la Figura 5.13 se observan datos singulares para el ancho de banda de coherencia entre los 12 y 25 MHz, puesto que la mayoría de los datos se halla en torno a los 5 MHz. Por ello, se ha decidido excluir estos valores del ajuste realizado. Similarmente al resultado de la banda B1, el *delay spread* oscila alrededor de los 14 ns.

Por otra parte, la Figura 5.14 refleja un comportamiento que se ajusta más al del modelo descrito en la ecuación (5.3). Aún así, los valores de ancho de banda de coherencia están más repartidos que en la banda anterior. Aquello que sí se cumple es el hecho que el *delay spread* es mayor en el caso de OLOS.

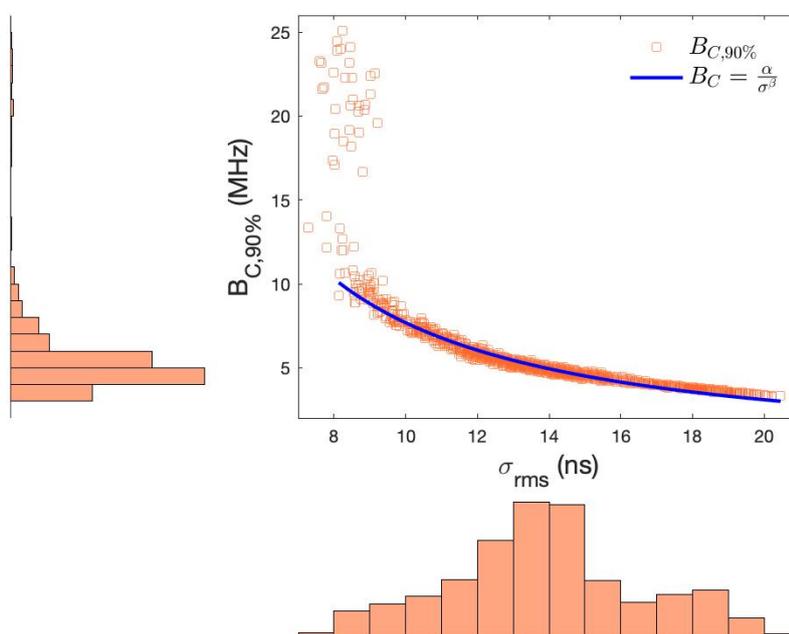


Figura 5.13: Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90 % y σ_{rms} en situación de LOS para la banda B2.

La Tabla 5.10 resume los valores de los parámetros α y β , así como sus intervalos de confianza. Destacar que el coeficiente de determinación es menor en el caso de LOS debido a la existencia de valores singulares. Quitando estos valores, el ajuste en LOS sería mucho más preciso como se desprende del histograma de la Figura 5.13.

	Parámetro	Valor obtenido	Intervalo de confianza (95 %)	R^2
LOS	α	171.3	(165.3, 177.2)	0.9582
	β	1.344	(1.33, 1.358)	
OLOS	α	113	(98.75, 127.3)	0.8099
	β	1.165	(1.119, 1.21)	

Tabla 5.10: Parámetros del ajuste entre el ancho de banda de coherencia y el *delay spread* para la banda B2.

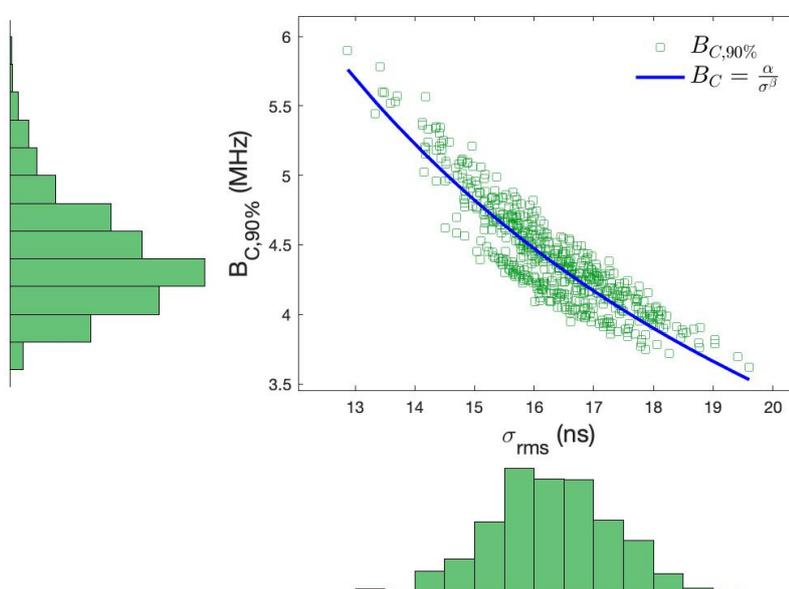


Figura 5.14: Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90 % y σ_{rms} en situación de OLOS para la banda B2.

5.4.4. Banda B3 (31.8 a 33.4 GHz)

De igual forma que en las anteriores bandas, las Figuras 5.15 y 5.16 muestran la relación entre el *delay spread* y el ancho de banda para una coherencia del 90 %. En concreto, se observa un gran ajuste de los datos al modelo para LOS y un alto desajuste para OLOS. Respecto a los valores obtenidos, para el primer caso, al ancho de banda de coherencia se mueve principalmente desde los 3.5 hasta los 5 MHz para retardos entre 14 y 17 ns. En el segundo caso, se halla una gráfica mucho más dispersa con valores oscilantes entre 3 y 4.5 MHz para retardos de entre 15 y 20 ns.

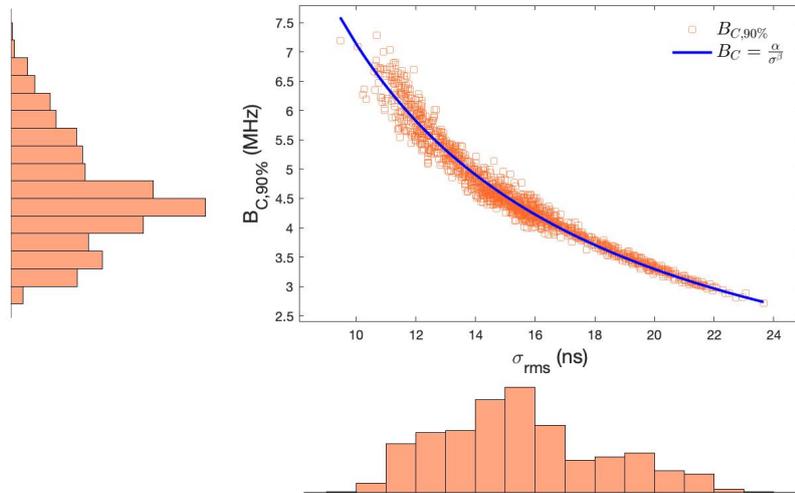


Figura 5.15: Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90 % y σ_{rms} en situación de LOS para la banda B3.

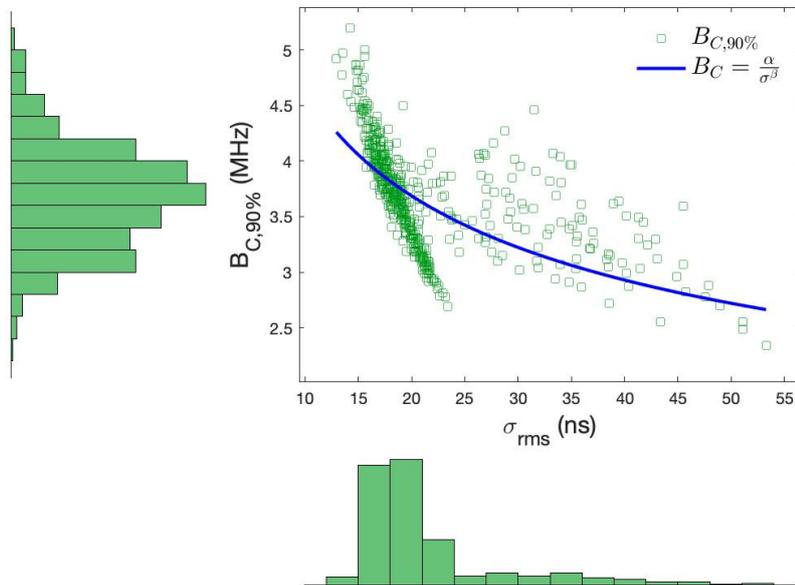


Figura 5.16: Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90 % y σ_{rms} en situación de OLOS para la banda B3.

En la Tabla 5.11 se proyectan los valores que muestran el comportamiento anteriormente explicado para las situaciones de visión directa y no visión directa, existiendo una gran diferencia en el parámetro α fruto de los valores más alejados de la media temporal.

	Parámetro	Valor obtenido	Intervalo de confianza (95 %)	R^2
LOS	α	92.86	(90.17, 95.55)	0.9664
	β	1.114	(1.104, 1.125)	
OLOS	α	55.06	(47.77, 62.35)	0.7644
	β	0.9246	(0.8789, 0.9703)	

Tabla 5.11: Parámetros del ajuste entre el ancho de banda de coherencia y el *delay spread* para la banda B3.

5.4.5. Banda B4 (37 a 40 GHz)

En la última banda, se contempla una situación similar a la banda B3. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 5.17, aquí el retardo está mucho más distribuido a lo largo de los 12 ns que se muestran en la gráfica. Respecto al ancho de banda de coherencia, el comportamiento es similar, si bien es cierto que la moda estaría en torno al intervalo entre 4 y 4.5 MHz.

Como se ha expuesto en el párrafo anterior, en la Figura 5.18, se ve una gráfica parecida a la correspondiente para la banda B3 en situación OLOS. Aparecen anchos de banda de coherencia singulares, en torno a 1.5 MHz para retardos del canal muy elevados, del orden de 70 ns. Estos valores distorsionan la gráfica haciendo ver que el modelo no ajusta dicha situación. Sin embargo, si estos valores se eliminasen del análisis se podría ver que esta afirmación es falsa, puesto que la gran mayoría de valores de *delay spread* se hallan en torno a los 18-20 ns.

Finalmente, en la Tabla 5.12, se exponen los parámetros, los intervalos de confianza y la bondad del ajuste realizado de acuerdo con la ecuación (5.3).

	Parámetro	Valor obtenido	Intervalo de confianza (95 %)	R^2
LOS	α	43.27	(41.25, 45.29)	0.8684
	β	0.884	(0.8653, 0.9026)	
OLOS	α	8.189	(7.742, 8.635)	0.6549
	β	0.2762	(0.2586, 0.2939)	

Tabla 5.12: Parámetros del ajuste entre el ancho de banda de coherencia y el *delay spread* para la banda B4.

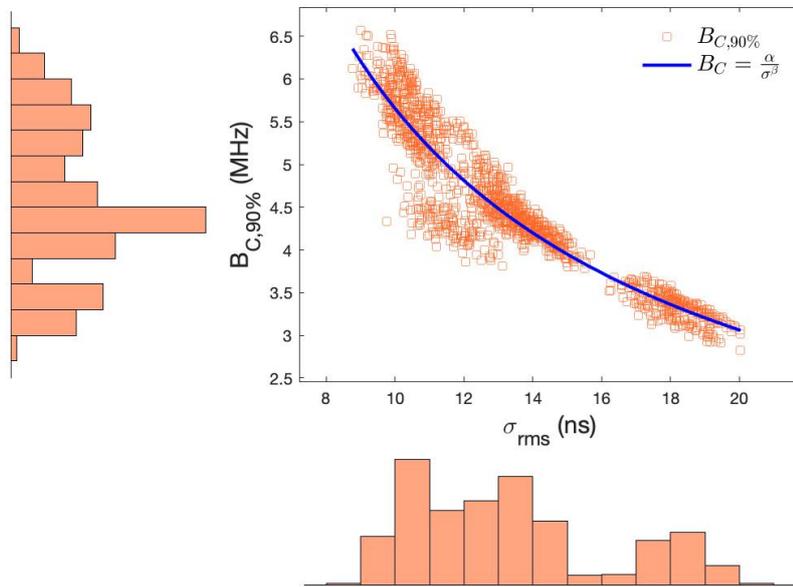


Figura 5.17: Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90 % y σ_{rms} en situación de LOS para la banda B4.

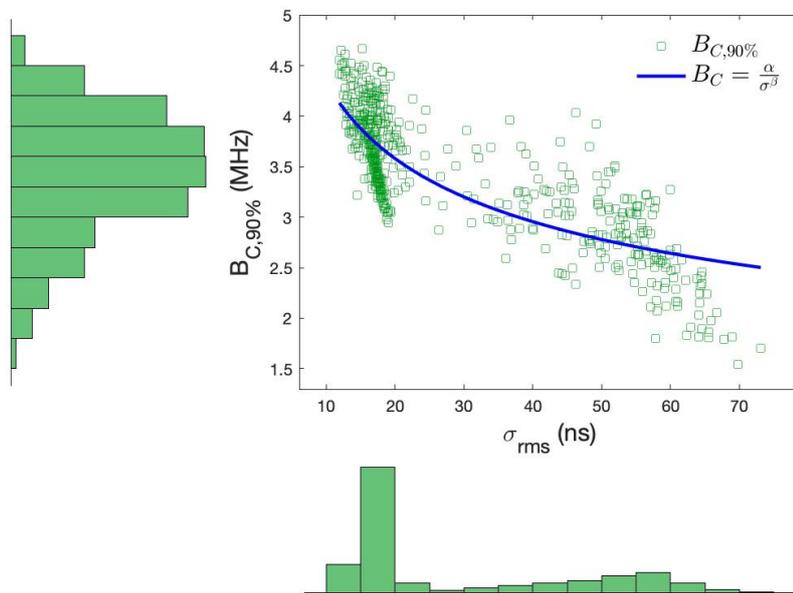


Figura 5.18: Relación entre el ancho de banda de coherencia al 90 % y σ_{rms} en situación de OLOS para la banda B4.

5.5. Clusterización

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos para el algoritmo de clusterización descrito en la sección de aspectos teóricos. En primer lugar, se ha considerado relevante incluir en la figura 5.19 la clusterización de un PDP ficticio ideal en que se definieron 5 clústeres bien diferenciados, para así comprobar su funcionamiento.

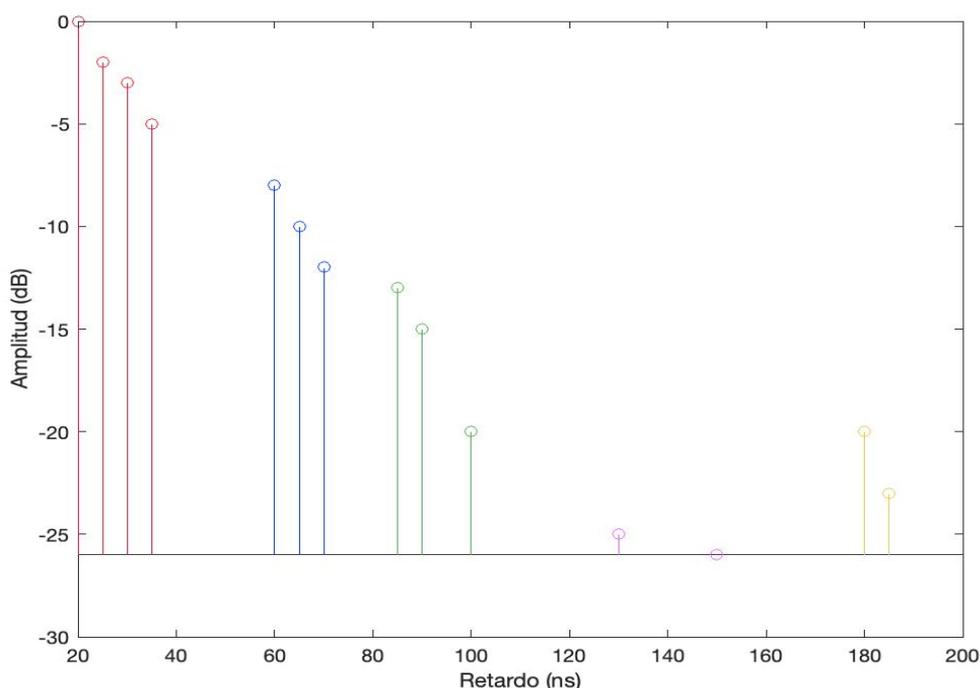


Figura 5.19: Verificación del funcionamiento del algoritmo.

5.5.1. Resultados

A continuación se muestran las figuras de distintos APDP en varias posiciones LOS y OLOS para cada una de las bandas definidas en la Tabla 1.1. Como se ve en la Figura 5.20, el número de clústeres es siete, mientras que en la Figura 5.21, este es de nueve.

Para la segunda banda de frecuencias, se ha decidido mostrar los clústeres relativos a los APDP de las posiciones 7 y 14, ofreciendo así una posición en LOS y otra de OLOS. El número de clústeres obtenidos ha sido 7 y 5, respectivamente.

Para la tercera banda de frecuencias, las Figuras 5.24 y 5.25 muestran la agrupación en clústeres de las contribuciones multicamino medidas. En concreto, se detectan dos para la posición 1 (LOS) y seis para la posición 12 (OLOS).

En la última banda, se muestra el resultado del algoritmo para las posiciones 10 en LOS y 13 en OLOS. El número de clústeres obtenido ha sido de cuatro y siete, respectivamente.

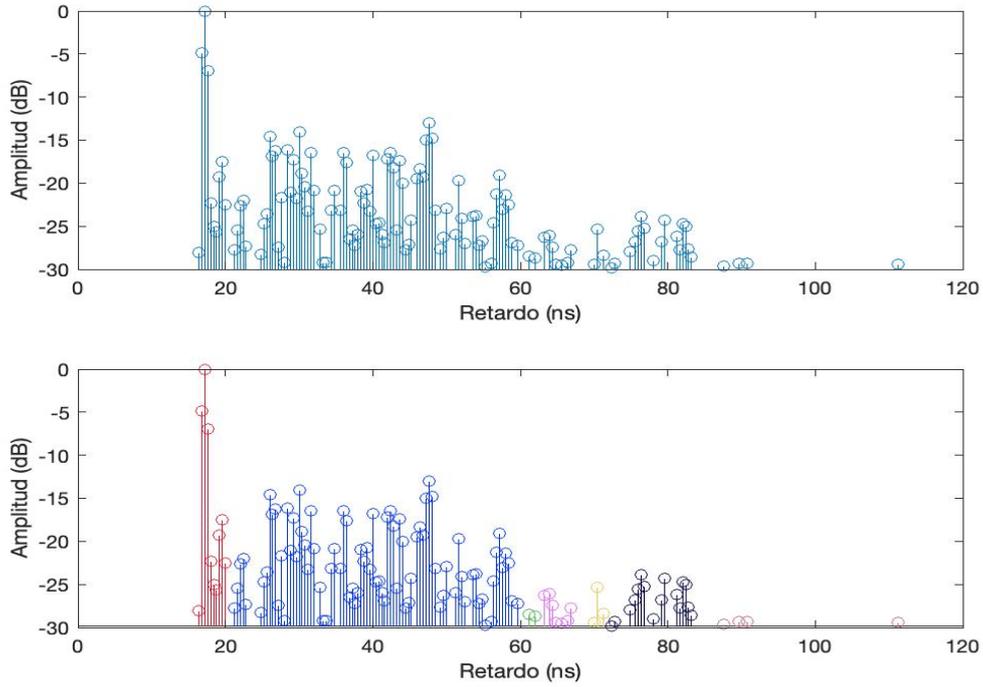


Figura 5.20: Clusterización del APDP de la posición 4 de la banda B1.

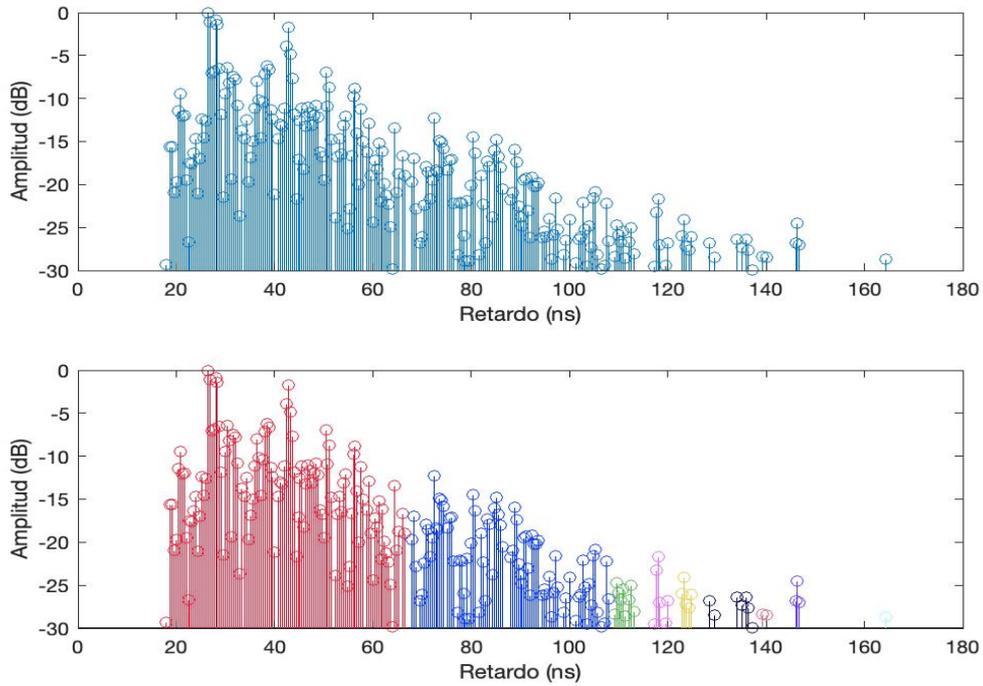


Figura 5.21: Clusterización del APDP de la posición 11 de la banda B1.

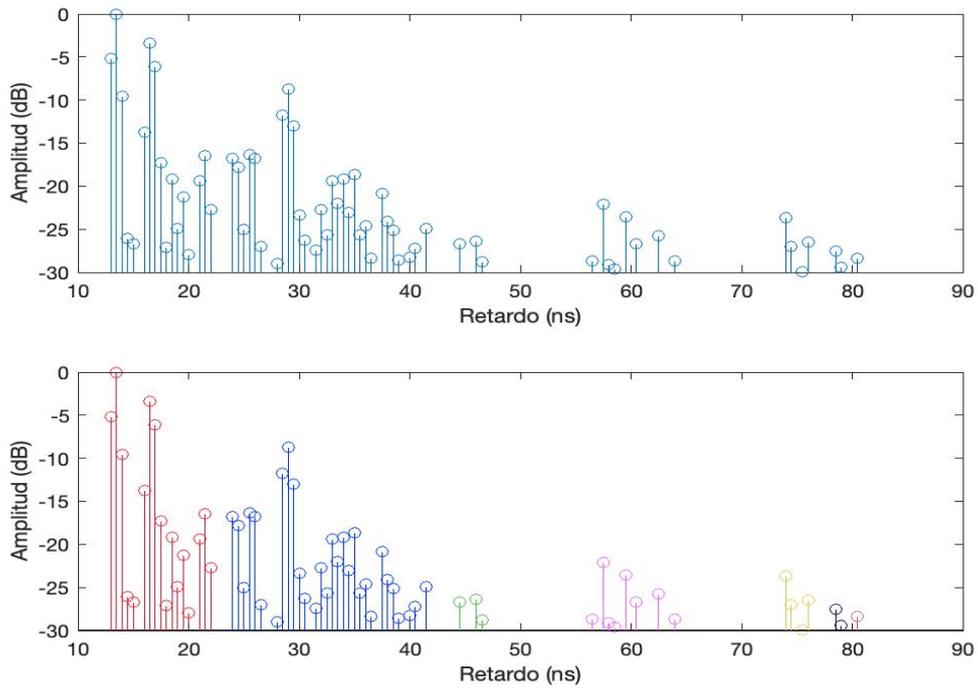


Figura 5.22: Clusterización del APDP de la posición 7 de la banda B2.

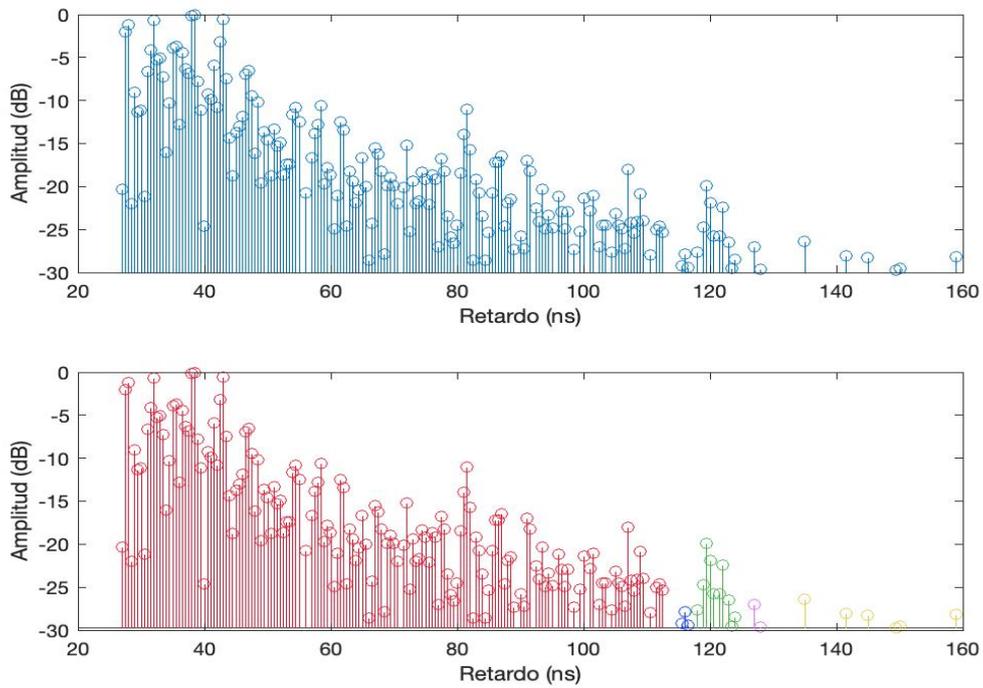


Figura 5.23: Clusterización del APDP de la posición 14 de la banda B2.

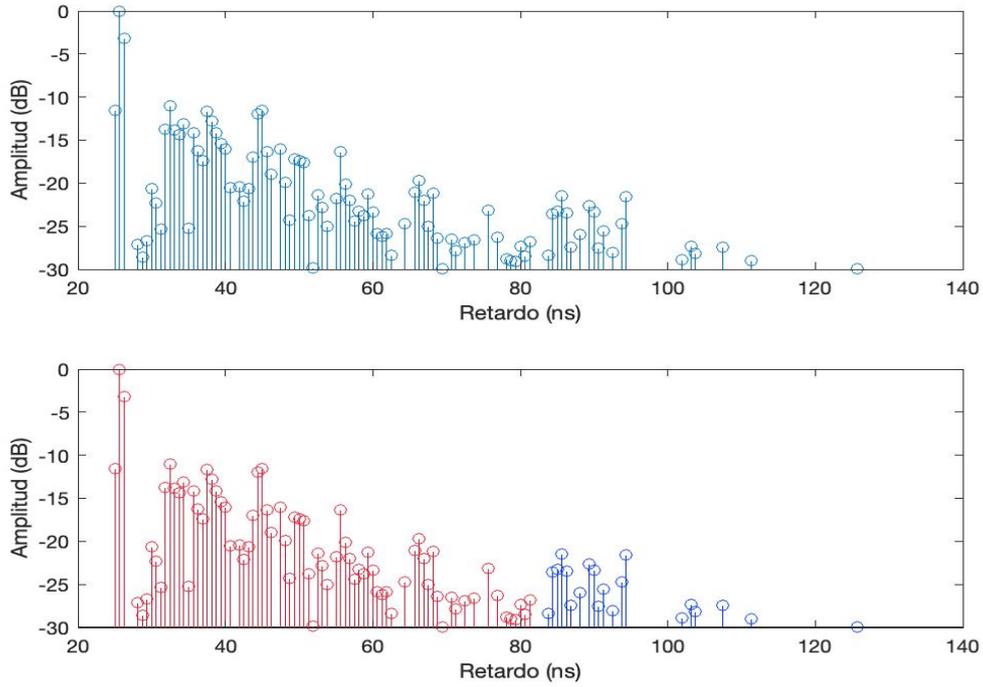


Figura 5.24: Clusterización del APDP de la posición 1 de la banda B3.

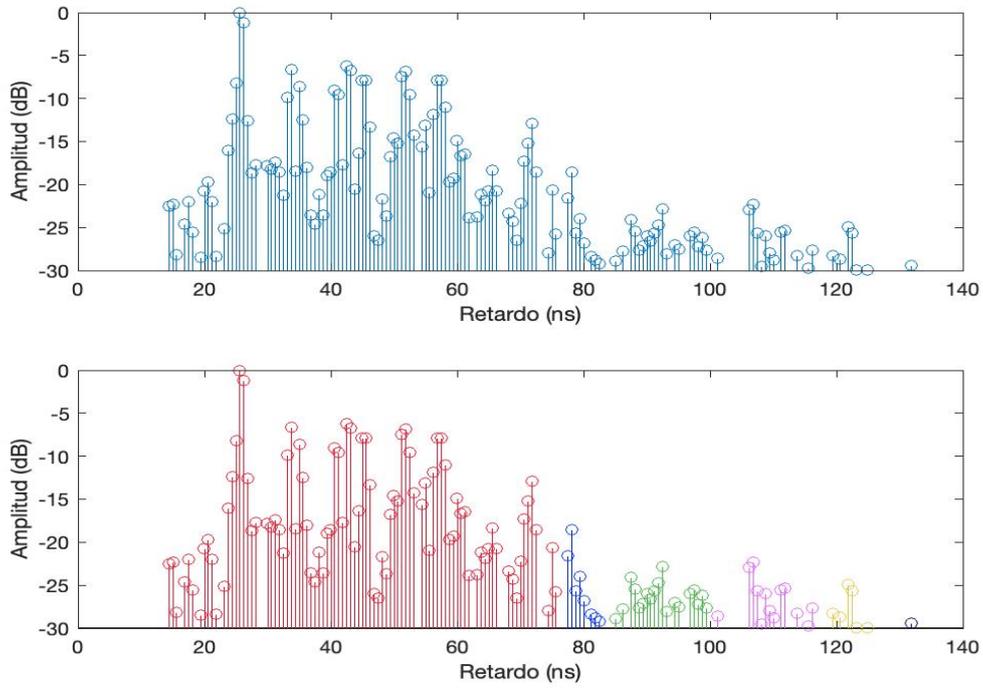


Figura 5.25: Clusterización del APDP de la posición 13 de la banda B3.

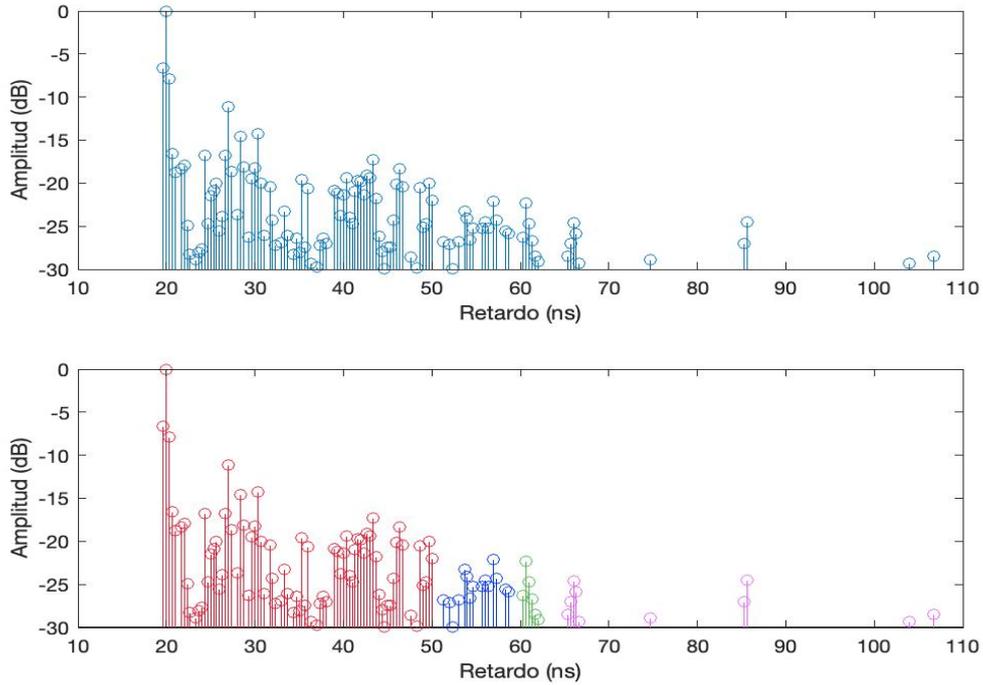


Figura 5.26: Clusterización del APDP de la posición 10 de la banda B4.

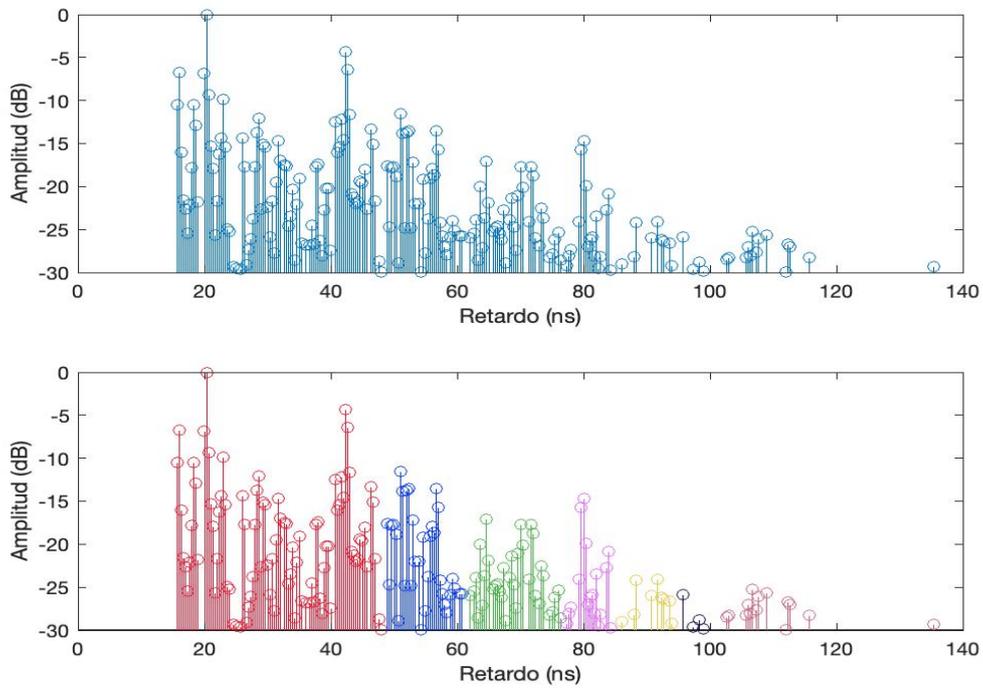


Figura 5.27: Clusterización del APDP de la posición 12 de la banda B4.

5.5.2. Evaluación de singularidades

El algoritmo de clusterización funciona de forma bastante adecuada tanto para las situaciones de LOS como para las de OLOS, así como para las distintas bandas de frecuencia que se han analizado, tal y como se ha podido comprobar en las figuras anteriores. Sin embargo, se ha detectado que, en determinadas medidas, puede surgir clústeres singulares detectados de forma incorrecta.

Este hecho suele ocurrir en los últimos clústeres, cuando el retardo es muy elevado pero las amplitudes son muy pequeñas. Debido a esto, el algoritmo detecta un único clúster cuando en realidad deberían ser separados en dos. Además, esta situación también puede ocurrir cuando el último clúster presenta una pendiente de ajuste positiva y por tanto se agrupa con el anterior, de acuerdo con el desarrollo definido en [8]. En la Figura 5.28 se puede observar dicho fenómeno.

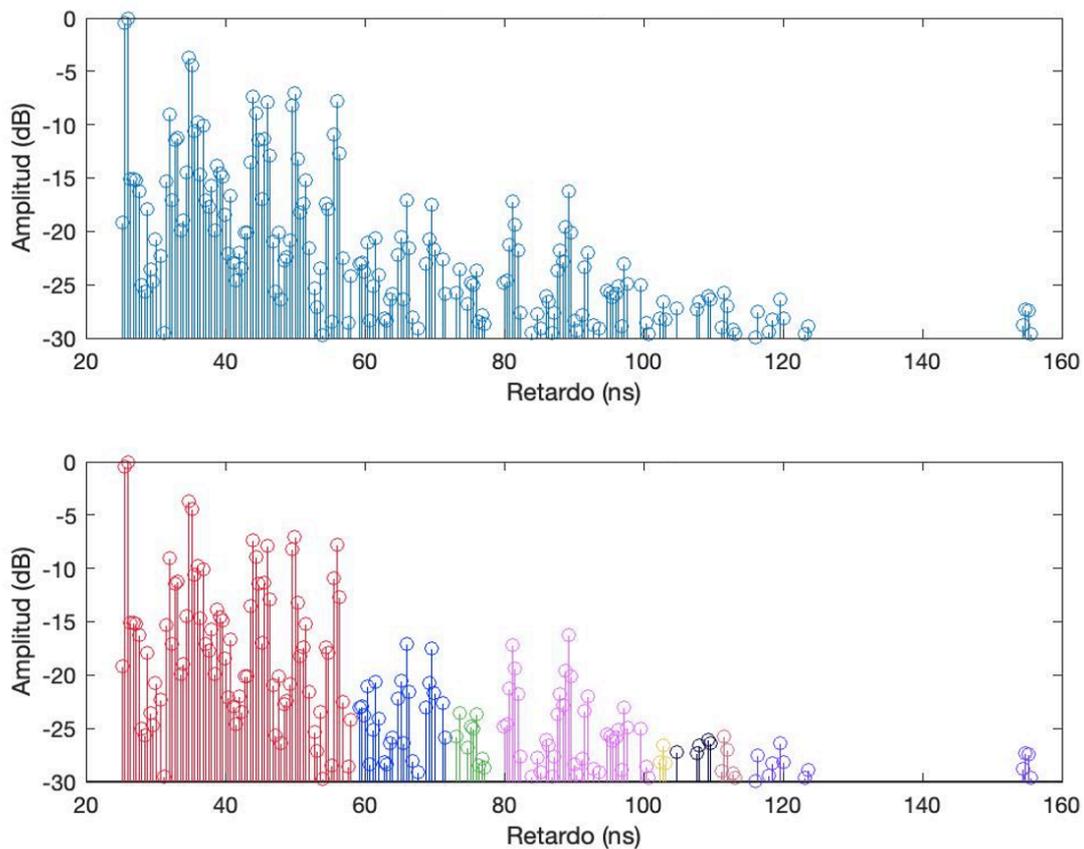


Figura 5.28: Ejemplo del caso descrito donde el algoritmo no detecta correctamente el último clúster como único.

5.6. Parametrización del canal

5.6.1. Introducción

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos al parametrizar el canal a partir del modelo descrito en el último apartado de la tercera sección de la memoria, el modelo Saleh-Valenzuela. En concreto, la estructura que se va a seguir para cada banda de frecuencias es la siguiente: primeramente, se mostrará los valores de los parámetros SV y posteriormente, se presentará los APDP con los ajustes correspondientes en escala lineal y dB.

Sin embargo, antes de empezar con el análisis, se ha decidido mostrar en la Figura 5.29 los valores del parámetro γ para los distintos clústeres tanto en OLOS como en LOS de la primera subbanda. Como se puede ver, hay algunos valores singulares que enturbiarían el análisis si los tuviésemos en cuenta, por lo que tras observar dichas gráficas se ha concluido que aquellos valores que superen los 200 ns se deben eliminar.

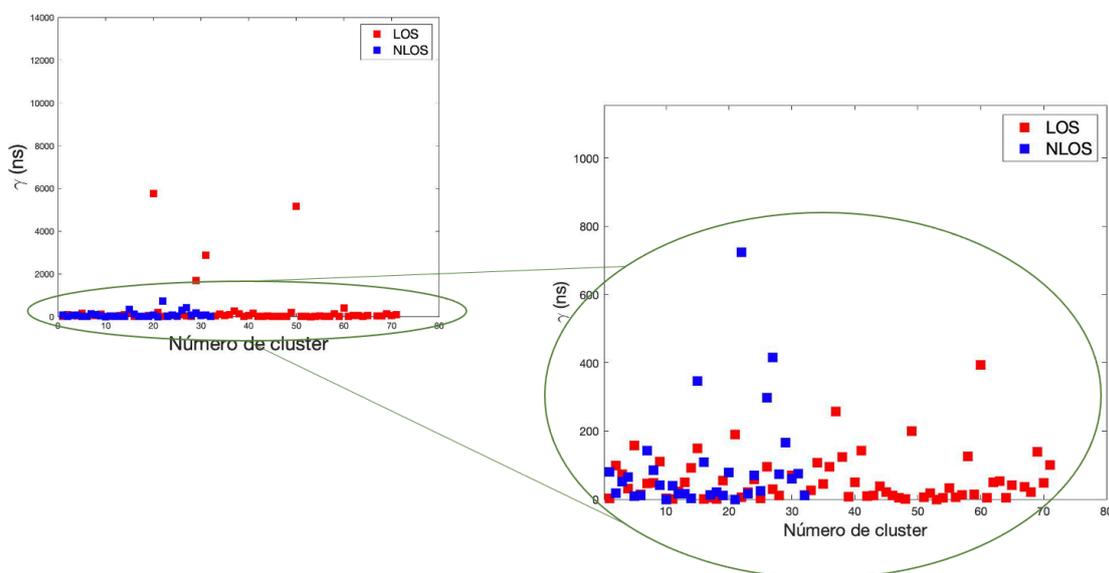


Figura 5.29: Justificación del umbral escogido para eliminar valores singulares de γ obtenidos tras la clusterización.

5.6.2. Resultados

Para la primera banda de frecuencias, los valores de los parámetros del modelo SV se disponen en la Tabla 5.13. Como se puede observar en la mayoría de casos de visión directa no se cumple que $\Gamma > \gamma$, lo cual se puede deber a los valores singulares de γ o a los errores que puedan derivarse del ajuste del último clúster, tal y como se ha explicado con anterioridad.

En las Figuras 5.30 y 5.31 se exponen los ajustes en lineal y en dB de los APDP para la banda B1. Las líneas naranjas representan el ajuste de Γ mientras que las negras corresponden a los γ obtenidos para cada clúster. En lineal, dichos ajustes se corresponden con exponenciales por lo que al traducirlo a unidades logarítmicas, los ajustes se convierten en rectas.

	Pos	γ (ns)	Γ (ns)	λ (ns ⁻¹)	Λ (ns ⁻¹)
LOS	T1	23.97	3.52	1.76	0.11
	T2	11.42	5.25	2.09	0.18
	T3	9.52	1.99	1.93	0.09
	T4	14.18	2.92	1.75	0.23
	T5	19.54	28.90	2.05	0.09
	T6	20.75	20.47	2.12	0.11
	T7	5.87	28.23	1.87	0.12
	T8	13.90	4.56	2.07	0.12
	T9	27.24	20.34	2.20	0.14
	T10	24.48	30.82	1.86	0.13
OLOS	T11	15.62	64.45	1.86	0.09
	T12	14.74	58.45	1.84	0.13
	T13	19.44	67.99	2.11	0.08
	T14	28.47	39.95	1.9913	0.08

Tabla 5.13: Valores de los parámetros del modelo SV para la banda B1.

Cabe destacar que el ajuste global de las figuras se ha realizado a partir de las amplitudes derivadas de los ajustes realizados para cada clúster, puesto que de esta forma se aproximaba mejor la respuesta impulsional del canal. Además, en las representaciones de la derecha se ha decidido fijar un umbral de -30 dB (ya que todas las contribuciones con menor amplitud serán eliminadas) con el fin de obtener una visión similar a la presentada en las anteriores secciones y para observar posibles errores en los ajustes.

	Pos	γ (ns)	Γ (ns)	λ (ns ⁻¹)	Λ (ns ⁻¹)
LOS	T1	30.91	21.25	1.71	0.07
	T2	12.54	34.64	1.57	0.14
	T3	3.57	12.03	1.69	0.04
	T4	43.88	3.49	1.47	0.11
	T5	38.95	33.52	1.61	0.14
	T6	42.37	27.98	1.70	0.11
	T7	15.88	8.37	1.41	0.17
	T8	22.49	7.15	1.71	0.11
	T9	13.21	1.97	1.80	0.19
	T10	10.42	40.80	1.49	0.13
OLOS	T11	58.85	54.13	1.49	0.01
	T12	51.17	37.69	1.57	0.09
	T13	21.23	112.80	1.68	0.08
	T14	37.22	44.67	1.52	0.14

Tabla 5.14: Valores de los parámetros del modelo SV para la banda B2.

En cuanto a los parámetros de la banda B2, se observa un comportamiento similar de los parámetros que modelan la amplitud. De nuevo, los parámetros λ y Λ cumplen con lo previsto para el modelo, pues en todos los casos el valor de λ es superior al de Λ . Todo esto se dispone en la Tabla 5.14.

En las Figuras 5.32 y 5.33, se muestran los ajustes realizados para los APDPs seleccionados para la banda B2. Como se puede ver en los ajustes lineales, la curva roja se adecua bastante bien el perfil dispuesto por los APDPs, pues abarca la mayoría de los valores de amplitud, si bien es cierto que al igual que en el caso anterior y en los futuros que se analizarán, aquellos valores de mayor amplitud distan bastante del ajuste.

Esto es debido al hecho que la diferencia de amplitudes de las principales contribuciones con el resto es bastante elevada. Además, tan sólo se reciben unas pocas contribuciones de dicha amplitud, por lo que esto no supone un error del ajuste.

Respecto a la banda B3, la presentación es análoga a las dos anteriores. Primeramente, se ha elaborado la Tabla 5.15, en la cual se muestran todos los parámetros del modelo SV para las 14 posiciones medidas. En concreto, se observa la tendencia que se ha descrito con anterioridad en la banda B2 y se ha verificado en B1.

	Pos	$\gamma (ns)$	$\Gamma (ns)$	$\lambda (ns^{-1})$	$\Lambda (ns^{-1})$
LOS	T1	37.08	35.30	1.28	0.02
	T2	27.25	7.59	1.38	0.05
	T3	39.29	19.90	1.29	0.03
	T4	41.27	42.88	1.16	0.08
	T5	19.72	20.34	1.15	0.08
	T6	50.84	37.37	1.31	0.05
	T7	37.77	8.56	1.45	0.10
	T8	18.69	13.50	1.25	0.10
	T9	40.76	45.77	1.12	0.05
	T10	26.60	17.31	1.21	0.13
OLOS	T11	43.87	49.08	1.35	0.04
	T12	67.82	56.80	1.04	0.05
	T13	23.82	59.40	1.12	0.07
	T14	19.04	42.64	1.15	0.08

Tabla 5.15: Valores de los parámetros del modelo SV para la banda B3.

Respecto a las Figuras 5.34 y 5.35, se observa un gran ajuste global en situación de LOS y un ligero error en el ajuste del primer clúster, debido a capturar las amplitudes más elevadas en detrimento de las más pequeñas, como bien se observa en la gráfica de la derecha. Respecto al ajuste realizado para la situación de OLOS, se observa tan sólo un error en el último clúster, debido a que el algoritmo detecta como primera contribución una de menor amplitud que las subsiguientes, con lo cual el ajuste realizado es incorrecto. Sin embargo, y como se puede ver en los demás clústeres el ajuste es correcto.

Para finalizar el análisis de la clusterización, se presentan los resultados obtenidos en la banda de frecuencias B4. De igual forma que en los casos anteriores, se muestran los parámetros calcula-

dos para el modelo SV en la Tabla 5.16. Si se atiende a los valores de Γ , la tabla muestra como en la mayoría de posiciones dicho parámetro es mayor o muy similar a γ . Estas posibles desviaciones que se han observado a lo largo de las cuatro bandas respecto con el modelo teórico se pueden deber a las aproximaciones realizadas y también a que las medidas analizadas no fueron realizadas de acuerdo con las suposiciones que se realiza en SV.

Por último, en las Figuras 5.36 y 5.37, se presentan dos APDPs con sus respectivos clústeres y ajustes para el modelo de SV.

	Pos	γ (ns)	Γ (ns)	λ (ns ⁻¹)	Λ (ns ⁻¹)
LOS	T1	22.58	29.49	2.12	0.22
	T2	15.50	3.45	2.49	0.27
	T3	11.62	10.48	2.68	0.12
	T4	24.29	2.62	1.82	0.13
	T5	12.92	6.11	2.29	0.19
	T6	14.64	6.21	2.04	0.07
	T7	14.82	18.17	2.21	0.15
	T8	12.18	9.24	2.24	0.12
	T9	32.38	5.82	2.21	0.11
	T10	12.53	21.70	2.45	0.11
OLOS	T11	28.27	46.29	1.91	0.10
	T12	30.49	56.04	2.24	0.09
	T13	20.54	75.32	1.91	0.11
	T14	29.38	257.28	1.86	0.14

Tabla 5.16: Valores de los parámetros del modelo SV para la banda B4.

5.6.3. Síntesis

Tras este extenso análisis de parametrización del canal medido al modelo teórico de Saleh-Valenzuela, se observan limitaciones del ajuste realizado. En primer lugar, el hecho que las contribuciones de mayor amplitud no sean las primeras identificadas por el *VNA* ni por el algoritmo de clusterización dificulta que se cumplan las condiciones ideales del modelo SV. Este hecho, entre otros, repercute en que no se cumpla la condición de los parámetros que modelizan la amplitud definida en el apartado teórico.

Otra de las limitaciones que puede afectar el ajuste sería la agrupación de clústeres indebidos al final del APDP, que si bien no afectan a los estadísticos del canal sí que lo hacen con los parámetros SV. Si la diferencia de retardos es muy grande en un mismo clúster, esto puede derivar en una mala estimación de γ . Por ello, al realizar la media con los demás clústeres, dicho valor podría aumentar indebidamente.

Por contra, sí se observa que se cumpla la condición de los tiempos de llegada para todas las posiciones y bandas de frecuencia. Esto es así puesto que los retardos no sufren los problemas de amplitud anteriormente descritos. Por ello, a la hora de elaborar un PDP sintético se observaría que los retardos serían similares a los del PDP original, pero las amplitudes diferirían de lo esperado.

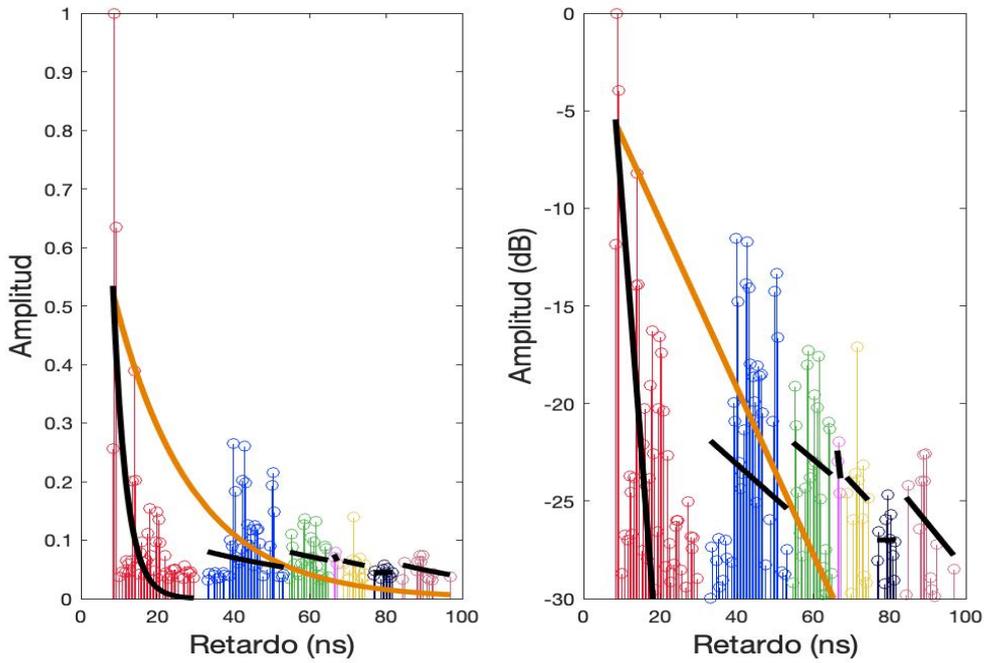


Figura 5.30: Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 9 de la banda B1.

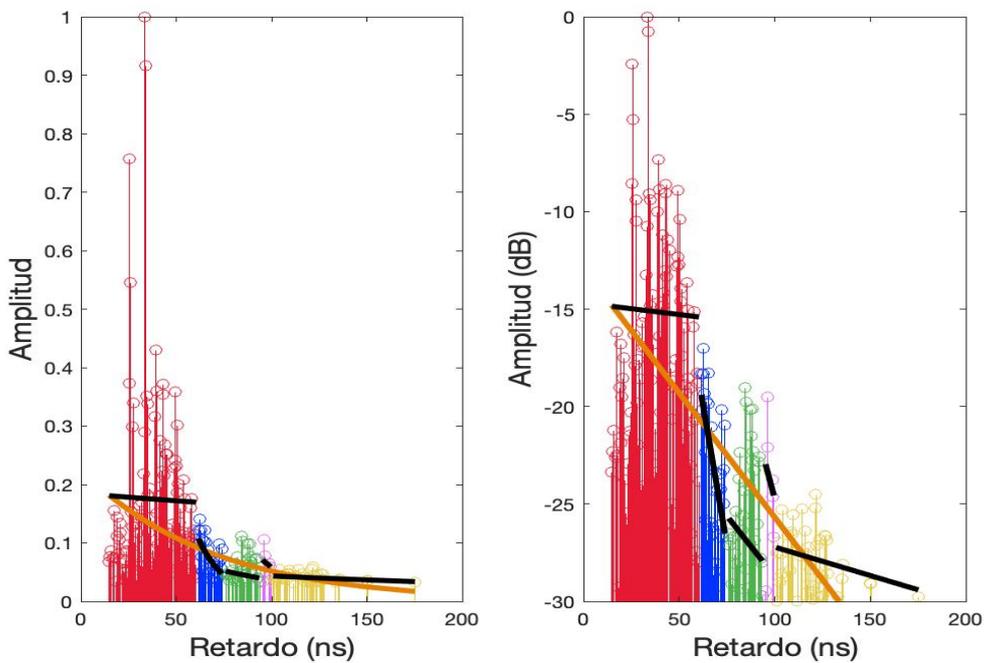


Figura 5.31: Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 13 de la banda B1.

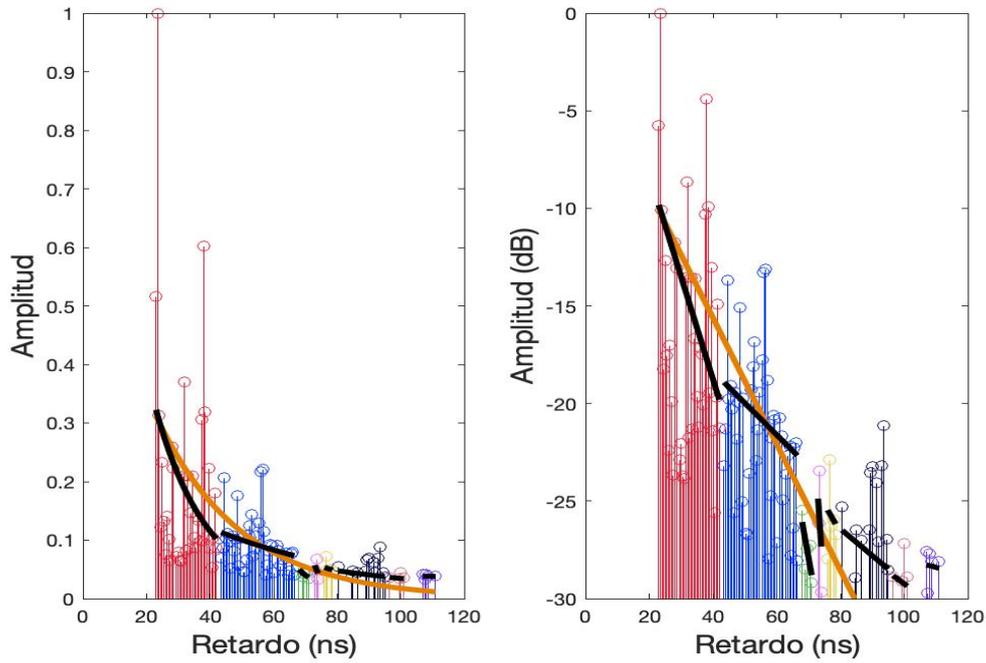


Figura 5.32: Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 5 de la banda B2.

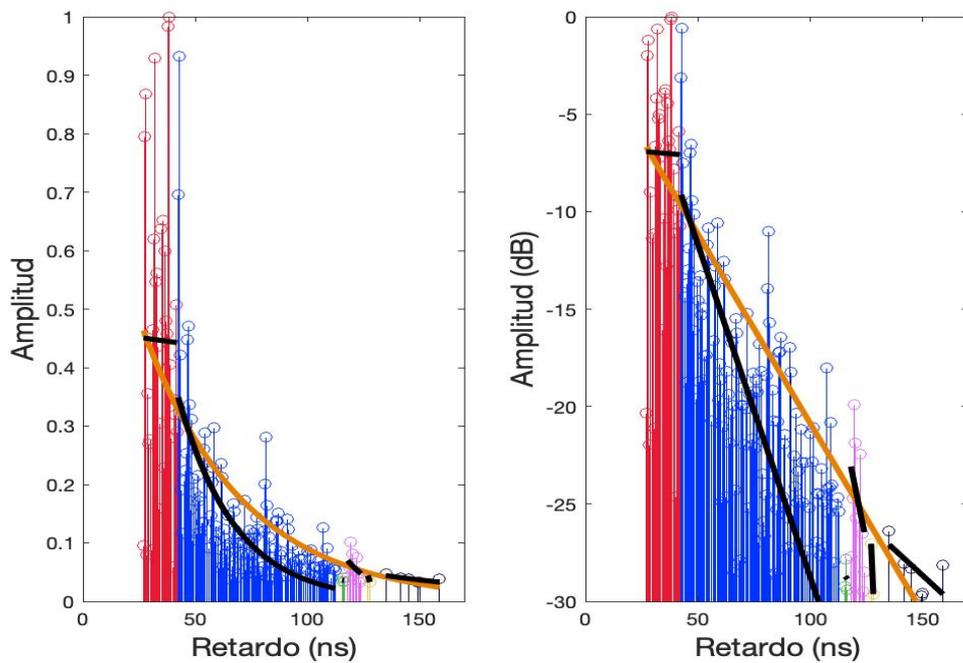


Figura 5.33: Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 14 de la banda B2.

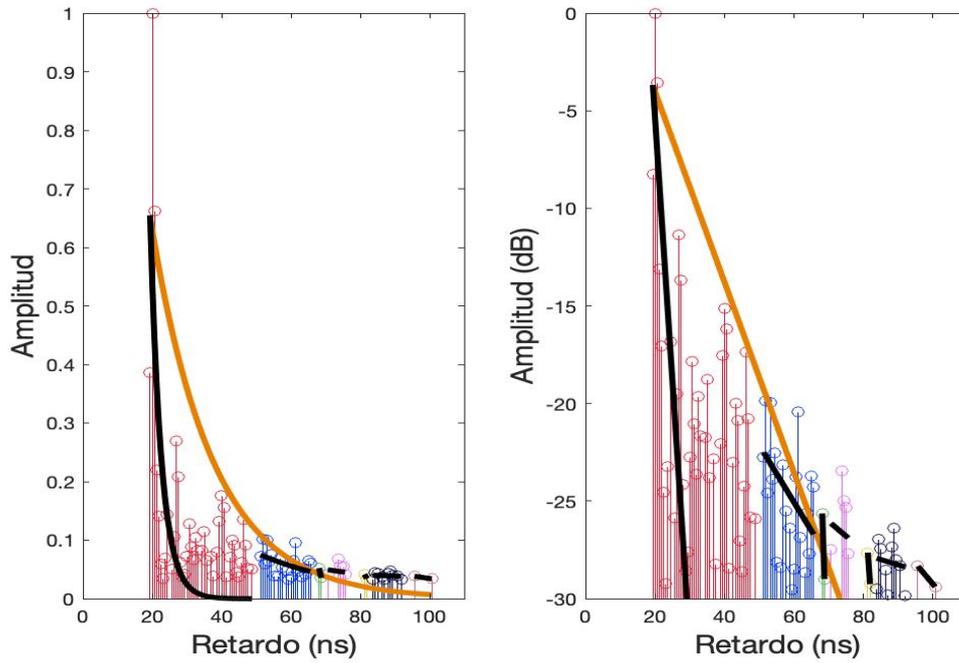


Figura 5.34: Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 10 de la banda B3.

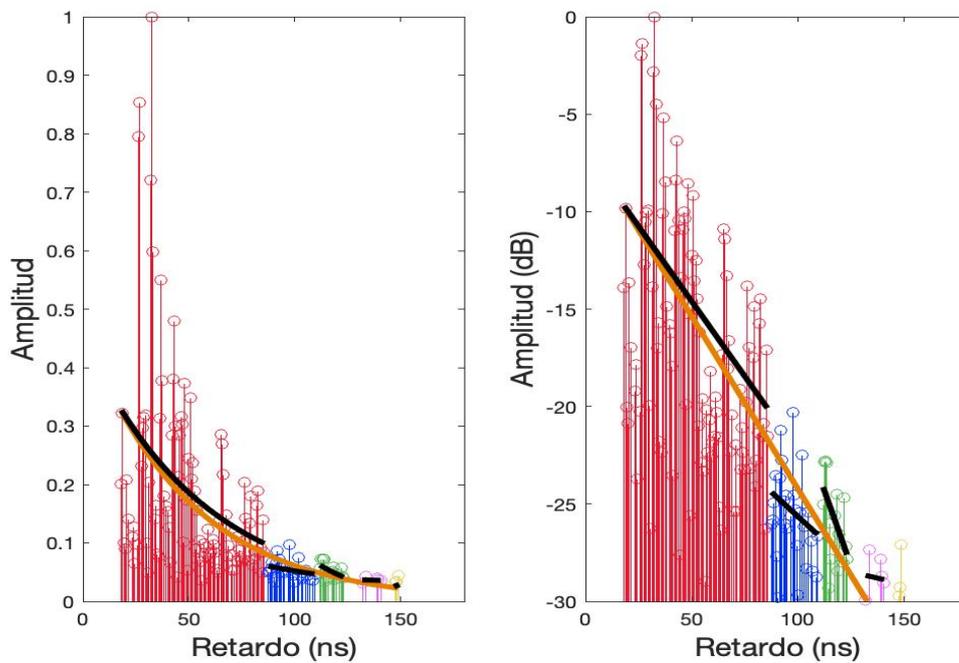


Figura 5.35: Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 11 de la banda B3.

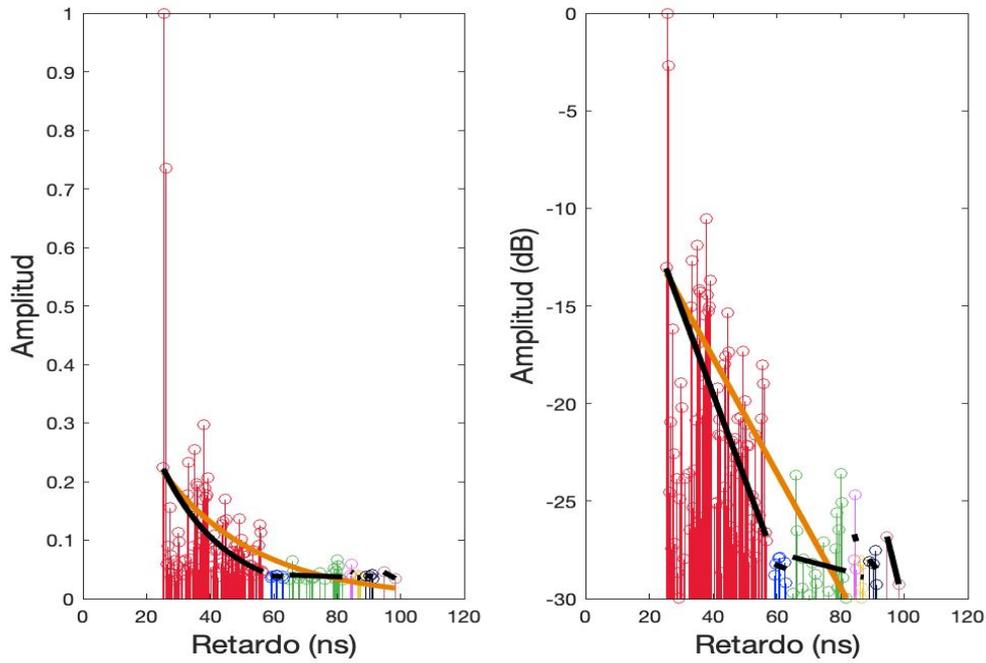


Figura 5.36: Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 1 de la banda B4.

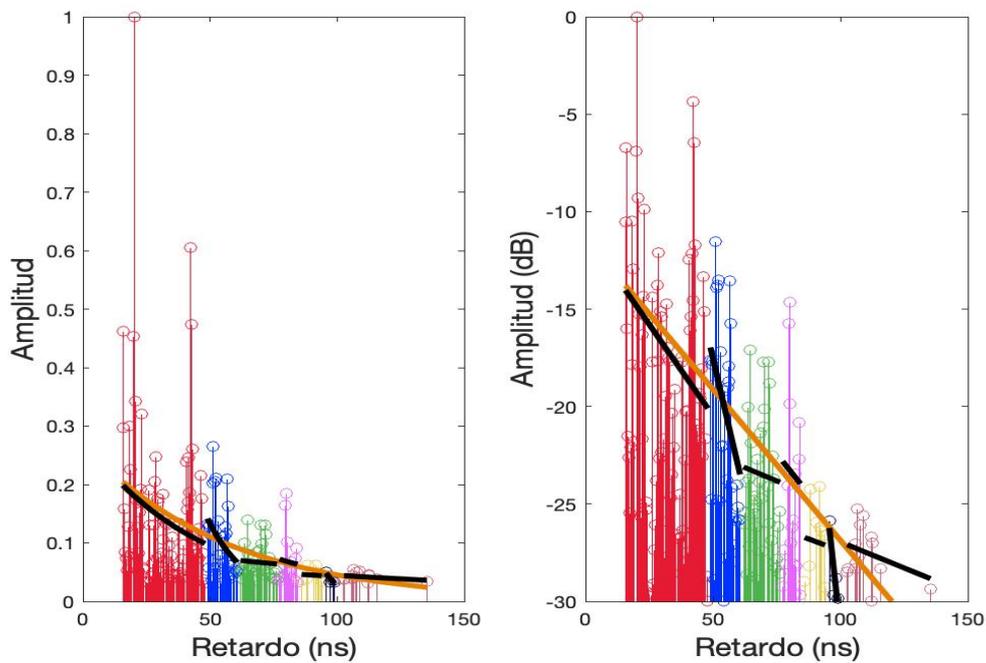


Figura 5.37: Ajustes en lineal (izquierda) y dB (derecha) de los parámetros γ y Γ a los APDP de las posición 12 de la banda B4.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1. Conclusiones

Una vez descritos los aspectos teóricos y tras haber analizado en profundidad el comportamiento del canal, es el momento de plantear las conclusiones de este TFG. Se ha cumplido con los objetivos propuestos al inicio del mismo: analizar el canal radioeléctrico para conseguir información relevante con el fin de realizar una clusterización del entorno medido en las bandas de frecuencias dispuestas para las redes de quinta generación o 5G definidas por la *ITU-R*.

En concreto, se ha analizado el *delay spread* del canal que permite entender la dispersión del canal radioeléctrico. Se ha observado su dependencia con la distancia entre transmisor y receptor que tiende a ser decreciente. Esto es a mayor distancia, mayor dispersión o menor σ_{rms} . Además se ha mostrado los valores medios de este parámetro para las cuatro bandas de análisis, el cual se sitúa entre 13.3 y 15.66 ns en el caso de LOS y entre 16.28 y 28.7 ns en situación de OLOS. Así pues, el valor de σ_{rms} es menor en el caso de LOS y mucho menos disgregado como se desprende de los valores de desviación típica presentados para ambos casos.

En segunda instancia, se ha analizado el ancho de banda de coherencia al 90 % por ser el más usado en la literatura para caracterizar el canal. En concreto, se ha estudiado la relación que éste presenta con respecto al *delay spread* a partir de un modelo empírico que define dicha relación. Por ello, se puede decir que a mayor σ_{rms} , menor será el ancho de banda de coherencia, de modo que cuando la dispersión temporal aumente, también lo hará la selectividad en frecuencia.

Así pues, tal y como se ha observado, a través del coeficiente de determinación, este modelo proporciona un ajuste bastante certero entre los dos estadísticos. En situación de LOS, el ancho de banda de coherencia oscila, principalmente, entre los 3.5 MHz y los 4.5 Mhz, si bien se ha visto que existen valores singulares en el análisis. Por otra parte, para OLOS, los anchos de banda suelen ser menores y se mueven entre los 2.5 y 4 MHz.

Posteriormente, tras el análisis de los parámetros del canal se ha realizado la clusterización de los APDPs obtenidos en las bandas de frecuencia. Los resultados para situación de LOS muestran que las primeras dos bandas presentarían siete clústeres en media, mientras que las dos últimas se agruparían en tres distintos. Por contra en OLOS, la tendencia es más similar en todo el espectro analizado, siendo la media obtenida de siete clústeres. Por ello, de acuerdo con el análisis derivado se concluye que el entorno de medición presenta una media de siete clústeres.

Finalmente, el objetivo principal de la clusterización es parametrizar el entorno medido mediante un modelo de canal que se ajuste de forma ecuánime a las distintas medidas realizadas. Además, cabe decir que los resultados obtenidos se ajustan al modelo SV en la mayoría de contribuciones multicamino tanto para LOS como para OLOS. Sin embargo, es cierto que no se cumple, en la mayoría de las posiciones, la condición establecida en el modelo de que $\Gamma > \gamma$, debido probablemente a las limitaciones que se han explicado con detalle durante el análisis. Pese a ello, la segunda condición de los parámetros del modelo sí se cumple y se verifica que efectivamente $\lambda > \Lambda$.

6.2. Líneas futuras

La continuación natural de este Trabajo de Fin de Grado sería incluir la información angular del canal que proporciona el algoritmo SAGE y realizar, a partir de ella, una clusterización angular de las medidas. Este paso se realizaría a continuación de la clusterización por amplitud realizada por el algoritmo y serviría para discernir si dichos clústeres se cumplen también para los ángulos de llegada. En [13] se puede hallar más información al respecto sobre cómo realizar este proceso mediante técnicas de *Machine Learning* (ML). Esto permitiría comparar los resultados obtenidos mediante ambos algoritmos, así como aliviar la carga de trabajo de programar el algoritmo desde cero, ya que existen funciones de clusterización en MATLAB diseñadas a partir de ML.

Otra interesante línea futura sería realizar una campaña de medidas en escenarios de exterior. Sería útil comprobar el funcionamiento del algoritmo programado en otro tipo de escenarios para verificar su funcionalidad. Además, con el fin de extraer las características del canal medido se debería hacer uso de otro tipo de modelos de propagación, como los propuestos en [14]. Esto completaría el trabajo realizado en este TFG.

Bibliografía

- [1] “Resolutions COM4/8-9”. En: *World Radio Communications Conference*. Sharm El-Sheikh, Egypt, 2019.
- [2] A.A.M. Saleh y R. Valenzuela. “A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation”. En: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 5.2 (1987), págs. 128-137. DOI: 10.1109/JSAC.1987.1146527.
- [3] J.D. Parsons. “The Mobile Radio Propagation Channel”. En: (ene. de 2000). DOI: 10.1002/0470841524.
- [4] Andres Escallon Portilla y Victor Guachetá. “Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play al integrar un módulo RoF”. Tesis doct. Dic. de 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.16893.82405.
- [5] P. Bello. “Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channels”. En: *IEEE Transactions on Communications Systems* 11.4 (1963), págs. 360-393. DOI: 10.1109/TCOM.1963.1088793.
- [6] Susana Mota y col. “Clustering of the multipath radio channel parameters”. En: *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation*. 2011, págs. 3232-3236.
- [7] Susana Ruiz García. “Diseño y validación de un sistema radio-software a canales en banda ancha”. Madrid, jun. de 2019. URL: <http://oa.upm.es/56794/>.
- [8] Michael Corrigan y col. “Automatic UWB clusters identification”. En: *2009 IEEE Radio and Wireless Symposium*. 2009, págs. 376-379. DOI: 10.1109/RWS.2009.4957359.
- [9] J.W. Wallace y M.A. Jensen. “Modeling the indoor MIMO wireless channel”. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 50.5 (2002), págs. 591-599. DOI: 10.1109/TAP.2002.1011224.

- [10] Peter Almers y col. “Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems.” En: *EURASIP J. Wireless Comm. and Networking* 2007 (ene. de 2007).
- [11] Lorenzo Rubio y col. “Contribution to the Channel Path Loss and Time-Dispersion Characterization in an Office Environment at 26 GHz”. En: *Electronics* 8.11 (nov. de 2019), pág. 1261. ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics8111261. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/electronics8111261>.
- [12] Raúl Cervera Marín. *Caracterización experimental de la dispersión temporal y angular del canal radio en un escenario de oficina*. Universitat Politècnica de València. 2020.
- [13] Ruisi He y Zhiguo Ding. *Applications of machine learning in wireless communications*, págs. 72-88.
- [14] Ibrahim A. Hemadeh y col. “Millimeter-Wave Communications: Physical Channel Models, Design Considerations, Antenna Constructions, and Link-Budget”. En: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 20.2 (2018), págs. 870-913. DOI: 10.1109/COMST.2017.2783541.