



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Tesis Doctoral

Caracterización experimental de las pérdidas de propagación en comunicaciones vehiculares a 700 MHz y 5,9 GHz

Universitat Politècnica de València

Departamento de Comunicaciones

Autor

Hermán Antonio Fernández González

Directores

Dr. Lorenzo Rubio Arjona

Dr. Juan Reig Pascual

Valencia, mayo 2014

A mis padres, esposa e hijos.

Agradecimientos

Son muchos los agradecimientos que debo dar con motivo de mi Tesis Doctoral, teniendo en cuenta, que han sido muchas las personas que directa o indirectamente me han acompañado en el proceso.

A Dios por darme la vida, salud, y guiar mi vida hacia proyectos que han enriquecido mi ser. A mi familia, esposa e hijos motor fundamental en mi carrera, siempre han estado ahí, apoyándome y fortaleciéndome cuando sentía desfallecer, o cuando el cansancio físico y mental necesario para realizar las cosas me aquejaban.

A mis tutores Lorenzo y Juan tengo tanto que agradecerles, tanto que decirles que a veces las palabras sobran, tan solo mis respetos, mi admiración, mi profundo sentimiento de amistad por estos dos grandes profesionales y seres humanos. Aunque las circunstancias no fueron fáciles, gracias a su apoyo, dedicación y paciencia logré aprovechar los conocimientos que solidariamente me brindaron. Han generado en mi un crecimiento profesional, intelectual y académico.

A mis amigos Daniel, Fernando, Diana, David y Andrés por el apoyo incondicional en tantos momentos y que de alguna forma han contribuido en esta realidad.

Por supuesto, también tengo que agradecer a Vicent Miguel, Toni, Bernat y Laura por su ayuda y colaboración.

De manera especial a Carmen, quien ha sido una gran amiga, con quien vivimos momentos muy entrañables en Valencia.

Resumen

En esta Tesis Doctoral se realiza una caracterización experimental de las pérdidas de propagación del canal radio vehicular basada en una extensa campaña de medidas realizada en diferentes escenarios de propagación, todos ellos potenciales entornos de comunicaciones vehiculares. Se han realizado medidas en escenarios urbanos, suburbanos, rurales y de autovía, con condiciones reales de tráfico rodado, diferentes densidades de vehículos y condiciones de propagación. La sonda de canal empleada en las medidas ha sido diseñada e implementada con el propósito de realizar una caracterización en banda estrecha permitiendo analizar el efecto de las pérdidas de propagación y desvanecimiento multicamino. Las medidas se han realizado en la banda DSRC (Dedicated Short-Range Communications) a 5,9 GHz, adoptada en EEUU y Europa para comunicaciones vehiculares, y en la banda de 700 MHz propuesta por Japón para este tipo de comunicaciones. En este sentido, los resultados mostrados en esta Tesis Doctoral a 700 MHz son los primeros realizados en esta banda de frecuencia.

Se han propuesto diferentes métodos de análisis de las medidas realizadas, permitiendo un extenso estudio de los parámetros que caracterizan las pérdidas de propagación. Se ha analizado el canal radio vehículo a vehículo (V2V, Vehicular-to-Vehicular) y el canal vehículo a infraestructura (V2I, Vehicular-to-Infrastructure), estableciendo un modelo lineal entre las pérdidas de propagación y el logaritmo de la distancia entre el transmisor y receptor. Se trata de un modelo sencillo, pero bastante exacto, que permite una fácil implementación en simuladores de redes vehiculares. A diferencia de otros trabajos previos, que solamente analizan valores medios de los parámetros del modelo de pérdidas, en esta tesis se presentan resultados que permiten conocer el rango de variación de dichos parámetros. En la investigación realizada se ha analizado el impacto que las condiciones de propagación, en lo que respecta a línea de visión directa y obstrucción de la misma, tienen sobre el comportamiento de la atenuación introducida por el canal radio.

Los resultados derivados de esta Tesis Doctoral pueden ser utilizados en el diseño y evaluación de protocolos de comunicación bajo condiciones de propagación próximas a la realidad, así como en el diseño y planificación de las futuras redes vehiculares.

Abstract

An experimental path loss characterization of the propagation channel in vehicular environments is performed in this PhD Dissertation. This characterization is based on an extensive narrowband channel measurement campaign. The measurements have been carried out in typical expected vehicular-to-vehicular (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communications environments, i.e., urban, suburban, rural and highway scenarios, for different road traffic densities, vehicles speed and propagation conditions.

The channel sounder used in the measurement campaign has been designed and implemented for the purpose of performing a narrowband characterization, allowing us to analyze both the path loss and fading statistics due to multipath propagation. The measurements were performed in the dedicated short-range communications (DSRC) band at 5.9 GHz. This band has been allocated in USA and Europe for the deployment of safety applications under the intelligent transportation system (ITS) concept. Also, we have performed simultaneously measurement at 700 MHz, which is the frequency band allocated recently by Japan for ITS applications. To the best of the author's knowledge, the results derived in this PhD Dissertation are the first in this opening band.

Different methods have been proposed for analyzing the measurements, allowing us an extensive analysis and study of the path loss for V2V and V2I propagation channels. A linear relationship between the path loss and the transmitter-receiver separation distance has been proposed. This is a simple model, but accurate, that permits us an easy implementation in vehicular networks simulators. Unlike previous works, where only mean values of the path loss models have been reported, the validity range of the model parameters has been analyzed in this PhD Dissertation. In this research, the impact of the propagation conditions, related to line-of-sight (LOS) and non-LOS (NLOS), over the path loss model parameters has been investigated. The differences observed between LOS and NLOS suggest consider the propagation conditions to improve the path loss characterization.

This PhD Dissertation contributes to a better understanding of the path loss propagation in vehicular channels. Therefore, the re-

sults derived here can be used to design and evaluate communications protocols and system architectures for the future vehicular networks, taking into account more realistic propagation conditions.

Resum

En aquesta tesi doctoral es realitza una caracterització experimental en banda estreta del canal ràdio vehicular basada en una extensa campanya de mesures realitzada en diferents escenaris de propagació, tots ells potencials entorns de comunicacions vehiculars. S'han realitzat mesures en escenaris urbans, suburbans, rurals i d'autovia, amb condicions reals de tràfic rodat, diferents densitats de vehicles i condicions de propagació. La sonda de canal empleada en les mesures ha estat dissenyada i implementada amb el propòsit de realitzar una caracterització en banda estreta permetent analitzar l'efecte de les pèrdues de propagació i esvaïment multicamí. Les mesures s'han realitzat en la banda DSRC (*Dedicated Short-Range Communications*) a 5,9 GHz, adoptada als EUA i Europa per a comunicacions vehiculars, i en la banda de 700 MHz proposta per Japó per a aquest tipus de comunicacions. En aquest sentit, els resultats mostrats en aquesta tesi doctoral a 700 MHz són els primers realitzats en aquesta banda de freqüència.

S'han proposat diferents mètodes d'anàlisi de les mesures realitzades, permetent un extens estudi dels paràmetres que caracteritzen les pèrdues de propagació. S'ha analitzat el canal ràdio vehicle a vehicle (V2V, *Vehicular-to-Vehicular*) i el canal vehicle a infraestructura (V2I, *Vehicular-to-Infrastructure*), establint un model lineal entre les pèrdues de propagació i el logaritme de la distància entre el transmissor i receptor. Es tracta d'un model senzill, però prou exacte, que permet una fàcil implementació en simuladors de xarxes vehiculars. A diferència d'altres treballs previs, el quals únicament analitzen valors mitjans del paràmetres del model de pèrdues, en aquesta tesi es presenten resultats que permeten conèixer el rang de variació dels paràmetres anteriors. En la investigació realitzada s'ha analitzat l'impacte que les condicions de propagació, pel que fa a línia de visió directa i obstrucció de la mateixa, tenen en el comportament de l'atenuació introduïda pel canal ràdio.

Els resultats derivats d'aquesta tesi doctoral poden utilitzar-se en el disseny i avaluació de protocols de comunicació sota condicions de propagació pròximes a la realitat, així com en el disseny i planificació de les futures xarxes vehiculars.

Contenido

Índice de Figuras	xv
Índice de Tablas	xxi
1. Introducción	1
1.1. Objetivos de la Tesis Doctoral	2
1.2. Organización de la Tesis Doctoral	3
1.3. Principales aportaciones y publicaciones	4
2. Caracterización del canal radio vehicular	9
2.1. Caracterización del canal de propagación	10
2.1.1. Parámetros de la dispersión en el tiempo	13
2.1.2. Parámetros de la dispersión en frecuencia	14
2.2. Medidas en canales vehiculares	14
2.2.1. Técnicas de medida de canal	15
2.2.2. Campañas de medida en escenarios vehiculares	17
2.3. Caracterización de canales V2X de banda estrecha	18
2.3.1. Path-loss	19
2.3.2. Espectro Doppler	29
2.3.3. Estadísticas de desvanecimiento	41
3. Sistemas de medida y descripción de los escenarios de propa- gación	45
3.1. Introducción	45
3.2. Sonda de canal	46
3.2.1. Sonda a 5,9 GHz	46
3.2.2. Sonda a 700 MHz	52
3.2.3. Equipos y cuestiones comunes para los dos sistemas	56
3.2.4. Estación transmisora sistema V2I	59
3.3. Balance de potencias	60
3.3.1. Banda 5,9 GHz para V2V	60

CONTENIDO

3.3.2. Banda 700 MHz para V2V	62
3.3.3. Banda 5,9 GHz para V2I	63
3.3.4. Banda 700 MHz para V2I	67
3.4. Descripción de los escenarios de propagación y planificación de la campaña de medidas	68
3.4.1. Introducción	68
3.4.2. Descripción de los escenarios de propagación	69
3.4.3. Planificación de nuestra campaña de medidas	75
3.5. Calibración del sistema	81
4. Resultados experimentales V2V	85
4.1. Introducción	85
4.2. Metodología y análisis de las medidas	86
4.2.1. Metodología	86
4.2.2. Métodos de análisis	86
4.3. Resultados fusión de registros	88
4.4. Resultados registros individuales	90
4.5. Resultados algoritmo de ventana deslizante	95
4.6. Resultados condiciones LOS y NLOS	98
4.7. Resultados condiciones LOS-NLOS y análisis algoritmo de ventana deslizante	109
4.8. Análisis de resultados	114
5. Resultados experimentales V2I	123
5.1. Introducción	123
5.2. Descripción de la metodología utilizada para el análisis de las medidas	124
5.3. Resultados experimentales	128
5.3.1. Resultados escenario urbano alta densidad	128
5.3.2. Resultados escenario de autovía (pasarela)	135
5.4. Análisis de resultados	136
6. Conclusiones y líneas futuras	147
6.1. Conclusiones	147
6.2. Líneas futuras	150
Referencias	155

Índice de Figuras

2.1. Descripción del modelo de canal TDL basado en elementos de retardo.	12
2.2. Sonda de canal correlativa basada en el principio de señal PN.	17
2.3. Geometría para el modelo de <i>path-loss</i> para microceldas NLOS WINNER.	22
2.4. Geometría del modelo de propagación a dos rayos.	24
2.5. Modelo de propagación a dos rayos: (a) interferencia entre el trayecto directo y el reflejado, y (b) <i>path-loss</i> total.	26
2.6. Geometría del modelo de <i>path-loss</i> de la Universidad de Kangaku para condiciones LOS.	27
2.7. Geometría del modelo de <i>path-loss</i> de la Universidad de Kangaku para condiciones NLOS.	29
2.8. Función de autocorrelación del modelo de doble anillo para varios valores de a	31
2.9. Densidad espectral de potencia Doppler para canales V2V isotrópicos.	31
2.10. Entorno dispersivo para sistemas V2V con desvanecimiento tipo Rice.	32
2.11. Función de densidad de probabilidad Von Mises.	34
2.12. Parte real de $R_{ggRa}(\tau)$	35
2.13. Densidad espectral de potencia Doppler para canales V2V no-isotrópicos.	36
2.14. Ilustración de la geometría del modelo y su correspondiente densidad espectral de potencia Doppler.	37
2.15. Modelo para centro urbano	39
2.16. Función de densidad de probabilidad Rayleigh.	42
2.17. Función de densidad de probabilidad Rice.	43
2.18. Función de densidad de probabilidad Nakagami- m	43
3.1. Sonda de canal a 5,9 GHz.	46

ÍNDICE DE FIGURAS

3.2. Vehículos Tx-Rx junto con el equipamiento de a bordo a 5,9 GHz.	47
3.3. Margen dinámico del ARV en función del ancho de banda de frecuencia intermedia B_{FI} .	49
3.4. Amplificadores del sistema a 5,9 GHz.	50
3.5. Parámetros de dispersión de los amplificadores a 5,9 GHz.	51
3.6. Antena monopolo utilizada en las medidas y su correspondiente patrón de radiación en el plano de elevación.	52
3.7. Sonda de canal a 700 MHz.	53
3.8. Vehículos Tx/Rx junto con el equipamiento de a bordo a 5,9 GHz y 700 MHz.	54
3.9. Monopolos con base magnética.	55
3.10. Equipo GPS e interfaz controladora.	57
3.11. Sincronismo en las medidas.	58
3.12. Mástil utilizado como antena del Tx para modelar sistemas V2I.	59
3.13. Diagrama de radiación de las antenas empleadas.	61
3.14. Esquemático sistema V2V a 5,9 GHz.	61
3.15. Esquemático sistema V2V a 700 MHz.	62
3.16. Modelos a dos rayos.	63
3.17. Efecto de las alturas sobre la atenuación.	64
3.18. Ángulo en función de la distancia de separación Tx-Rx.	65
3.19. Patrón de radiación para la atenuación.	65
3.20. Esquemático sistema V2I a 5,9 GHz.	66
3.21. Esquemático sistema V2I a 700 MHz.	67
3.22. Escenario urbano de alta densidad de tráfico rodado	70
3.23. Casco antiguo	71
3.24. Ensanche	72
3.25. Zona residencial	73
3.26. Escenarios suburbanos	74
3.27. Escenarios rurales	74
3.28. Escenarios de autovía	75
3.29. Pruebas en el laboratorio a 5,9 GHz.	76
3.30. Medidas <i>path-loss</i> a 5,9 GHz.	77
3.31. Carreteras de la provincia de Valencia	78
3.32. Medidas escenarios suburbano, y urbanos de alta y baja densidad de tráfico rodado.	79
3.33. Casco Antiguo.	80
3.34. Medidas escenarios rural y de autovía.	80
3.35. Vista en planta vía de servicio.	81
3.36. Pérdidas de propagación vía de servicio, polígono y modelo teórico a dos rayos a 700 MHz.	82
3.37. Vista en planta tramo recto dentro del polígono.	82

3.38. Pérdidas de propagación dentro del polígono y modelo teórico a dos rayos a 5,9 GHz.	83
4.1. Pérdidas de propagación en función de la distancia de separación Tx-Rx, para un entorno urbano de alta densidad.	88
4.2. Diagrama de cajas del exponente de pérdidas de propagación para los escenarios 1, 2, 3, 4 y 5, a 700 MHz.	89
4.3. Diagrama de cajas del exponente de pérdidas de propagación para los escenarios 1, 2, 3, 4 y 5, a 5,9 GHz.	90
4.4. Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario urbano de alta densidad.	93
4.5. Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario de autovía.	93
4.6. Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario urbano de baja densidad.	94
4.7. Parámetros obtenidos para diferentes tamaños de ventana.	95
4.8. Histogramas del exponente de pérdidas para escenario urbano de alta densidad de tráfico.	98
4.9. Histogramas del exponente de pérdidas para escenario urbano de baja densidad de tráfico.	98
4.10. Histogramas del exponente de pérdidas para escenario suburbano.	99
4.11. Histogramas del exponente de pérdidas para escenario rural.	99
4.12. Histogramas del exponente de pérdidas para escenario de autovía.	99
4.13. Instalación de la cámara a bordo del vehículo Rx.	100
4.14. Distancia de separación Tx-Rx, velocidad de los vehículos y nivel de potencia medido sobre el tiempo.	101
4.15. Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario urbano de alta densidad.	102
4.16. Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario urbano de alta densidad.	102
4.17. Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario urbano de baja densidad.	103
4.18. Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario de autovía.	103
4.19. Histogramas del exponente de pérdidas para escenario urbano de alta densidad de tráfico, bajo condiciones LOS-NLOS.	106
4.20. Histogramas del exponente de pérdidas para escenario urbano de baja densidad de tráfico, bajo condiciones LOS-NLOS.	107
4.21. Diagrama de cajas del exponente de pérdidas de propagación para los escenarios 1, 2, 3, 4 y 5, a 700 MHz, bajo condiciones LOS y NLOS.	108
4.22. Diagrama de cajas del exponente de pérdidas de propagación para los escenarios 1, 2, 3, 4 y 5, a 5,9 GHz, bajo condiciones LOS y NLOS.	109

ÍNDICE DE FIGURAS

4.23. Histogramas del exponente de pérdidas para escenario urbano de alta densidad de tráfico, bajo condiciones LOS-NLOS. . . .	111
4.24. Histogramas del exponente de pérdidas para escenario urbano de baja densidad de tráfico, bajo condiciones LOS-NLOS. . . .	114
4.25. Histogramas del exponente de pérdidas para escenario suburbano, bajo condiciones LOS-NLOS.	115
4.26. Histogramas del exponente de pérdidas para escenario rural, bajo condiciones LOS-NLOS.	116
4.27. Histogramas del exponente de pérdidas para escenario de autovía, bajo condiciones LOS-NLOS.	117
4.28. Relación entre el exponente de pérdidas y L_0 a 5,9 GHz. . . .	121
4.29. Relación entre el exponente de pérdidas y L_0 a 700 MHz. . . .	122
4.30. Ajuste lineal.	122
5.1. Caso 1: Escenario urbano alta densidad a 5,9 GHz, $h_{Tx} = 4$ m., antena del Tx sin invertir.	125
5.2. Caso 2: Escenario urbano alta densidad a 5,9 GHz, $h_{Tx} = 4,0$ m., antena del Tx invertida.	126
5.3. Caso 3: Escenario urbano alta densidad a 700 MHz, $h_{Tx} = 3,0$ m., antena del Tx sin invertir.	128
5.4. Avenida de los Naranjos.	129
5.5. Avenida de los Naranjos.	131
5.6. Ubicación antenas en la pasarela.	134
5.7. Escenario urbano alta densidad, pasarela.	134
5.8. Escenario de autovía (pasarela).	137
5.9. Valores de γ a 700 MHz.	137
5.10. Valores de γ a 5,9 GHz.	139
5.11. Ajuste lineal.	139
5.12. Modelo a doble pendiente a 700 MHz.	141
5.13. Modelo a doble pendiente a 5,9 GHz.	141
5.14. Relación entre la distancia crítica experimental y la distancia crítica teórica a 700 MHz.	142
5.15. Relación entre la distancia crítica experimental y la distancia crítica teórica a 5,9 GHz.	142
5.16. Relación entre la distancia crítica experimental media y la distancia crítica teórica.	144
5.17. Constante de compensación de altura efectiva del terreno. . . .	144
6.1. Entornos de comunicaciones en sentido contrario.	151
6.2. Túneles.	151
6.3. Parking.	151
6.4. Intersecciones	152

6.5. Traza para el análisis del desvanecimiento a corto plazo. 153

Índice de Tablas

2.1. Medidas de canal vehicular. BE:Banda estrecha, BA:Banda ancha, U:Urbano, SU:Suburbano, R:Rural, A:Autopista, C:Carretera.	19
2.2. Parámetros para los modelos a una y dos pendientes generados de campañas de medida.	24
2.3. Rango de aplicación del modelo LOS de la universidad de Kangaku.	28
2.4. Parámetros medidos para el ensanchamiento Doppler <i>rms</i>	40
2.5. Parámetros medidos del espectro de potencia Doppler.	40
3.1. Parámetros de configuración del sistema de medidas.	63
4.1. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método fusión de registros), a 700 MHz y 5,9 GHz	88
4.2. Distancia de separación Tx-Rx (en metros)	89
4.3. Parámetros estadísticos del exponente de pérdidas de propagación a 700 MHz y 5,9 GHz.	91
4.4. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método registros individuales), a 700 MHz y 5,9 GHz.	92
4.5. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación a dos pendientes (método registros individuales), a 700 MHz y 5,9 GHz.	94
4.6. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método algoritmo de ventana deslizante), a 700 MHz y 5,9 GHz.	97
4.7. Parámetros medios del modelo de pérdidas de propagación (método cámara de vídeo), a 700 MHz y 5,9 GHz	104
4.8. Distancia de separación Tx-Rx (en metros).	104
4.9. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método cámara de vídeo), a 700 MHz y 5,9 GHz.	105
4.10. Parámetros estadísticos del exponente de pérdidas de propagación a 700 MHz y 5,9 GHz, bajo condiciones LOS y NLOS.	110
4.11. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método fusión de registros LOS y NLOS), a 700 MHz y 5,9 GHz.	111

ÍNDICE DE TABLAS

4.12. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método algoritmo de ventana deslizante en condiciones LOS y NLOS), a 700 MHz.	112
4.13. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método algoritmo de ventana deslizante en condiciones LOS y NLOS), a 5,9 GHz.	113
4.14. Parámetros medios del modelo de pérdidas de propagación (métodos de análisis), a 700 MHz y 5,9 GHz.	118
4.15. Parámetros medios del modelo de pérdidas de propagación (métodos de análisis LOS y NLOS), a 700 MHz y 5,9 GHz.	119
5.1. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad, sentido O-E.	129
5.2. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad, sentido E-O.	130
5.3. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad, sentido O-E.	131
5.4. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad, sentido E-O.	132
5.5. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad (cambio de posición de la antena del Tx).	133
5.6. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad, pasarela a 700 MHz.	135
5.7. Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad, pasarela a 5,9 GHz.	136
5.8. Escenario de autovía, a 700 MHz y 5,9 GHz, pasarela Bonaire.	138
5.9. Estadísticas del exponente de pérdidas de propagación en función de la altura del Tx, a 700 MHz y 5,9 GHz.	140
5.10. Compensación de la altura efectiva del terreno, h_0 . Escenario urbano de alta densidad (A-D), de acuerdo con el valor de D	143
5.11. Compensación de la altura efectiva del terreno, h_0 . Escenario urbano de alta densidad (A-D), de acuerdo con el valor de $\bar{d}c_e$	145

Glosario

AOA Angle-Of-Arival
AOD Angle-Of-Departure
CIR Channel Impulsive Response
DPDS Doppler Power Density Spectrum
DSRC Dedicated Short Range Communications
DSSS Direct Sequence Spread Spectrum
ERG Electromagnetic Radiation Group
F2M Fixed-to-Mobile
ICI Inter-Carrier Interference
ITS Intelligent Transportation Systems
LOS Line-Of-Sight
LSS Large Spatial Scale
LTV Linear Time Variant
MIMO Multiple-Input Multiple-Output
MPCs Multipath Components
MSS Moderate Spatial Scale
NLOS Non-Line-Of-Sight
OBU On-Board Unit
OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PDP Power Delay Profile
PDFs Probability Density Functions
PN Pseudo-Random Noise
PIRE Potencia Isotropica Radiada Equivalente
RCS Radar Cross Section
RSU Road Side Unit
SISO Single-Input Single-Output
SNR Signal-to-Noise
SoS Sum-of-Sinusoids
SSS Small Spatial Scale
TDL Tapped Delay Line
US Uncorrelated Scattering

UWB Ultra-Wideband
VANETs Vehicular Ad hoc Networks
V2V Vehicular-to-Vehicular
V2I Vehicular-to-Infrastructure
V2X Vehicular-to-Vehicular/Infrastructure
VTD Vehicular Traffic Density
WG Wave Generator
WINNER Wireless World Initiative New Radio
WSS Wide Sense Stationary

Capítulo 1

Introducción

El diseño de los futuros sistemas de comunicaciones vehiculares ha atraído en los últimos años la atención de la comunidad científica, los organismos de estandarización y fabricantes de vehículos debido al gran potencial de dichos sistemas para mejorar las condiciones de seguridad en las carreteras, teniendo como propósito reducir el número de accidentes de tráfico y facilitar el flujo vehicular [1], [2]. Los sistemas de transporte inteligente (ITS, Intelligent Transportation Systems), requieren que las comunicaciones vehículo a vehículo (V2V, Vehicular-to-Vehicular) y vehículo a infraestructura (V2I, Vehicle-to-Infrastructure) sean seguras y fiables. En este sentido se precisa un conocimiento profundo de los parámetros que determinan la caracterización del canal de propagación. Asimismo, la naturaleza del desvanecimiento selectivo en tiempo y frecuencia de los canales vehiculares es significativamente diferente a la de los canales móviles donde un terminal no se desplaza [3]-[6], lo que hace que se requieran nuevas campañas de medidas experimentales para un mejor conocimiento y nuevos modelos para su posterior simulación y evaluación.

El canal V2V difiere del canal de propagación fijo a móvil (F2M, Fixed-to-Mobile) en varios aspectos importantes: i) el entorno de propagación es diferente, ii) el transmisor (Tx) y receptor (Rx) se encuentran a la misma altura y en entornos similares, y iii) la alta movilidad del Tx y Rx, como también la de dispersores más importantes. Estas diferencias entre canales V2V y F2M provocan que los modelos de canal desarrollados para los sistemas F2M no se puedan aplicar en la evaluación del rendimiento y desarrollo de las futuras aplicaciones ITS, basadas en sistemas de comunicación vehiculares.

Las medidas de canal son esenciales para entender los fenómenos de propagación en escenarios específicos, y pueden utilizarse para validar y mejorar la precisión de los modelos de canal existentes. Un modelo de canal puede también incorporar resultados obtenidos con datos experimentales; es decir, los

parámetros estimados en campañas de medidas pueden incluirse en el modelo de canal, dando lugar a un modelo geométrico [7].

Es importante que las futuras redes vehiculares dispongan de un modelo de canal V2V y V2I, también se utiliza el término V2X para referirse indistintamente a los sistemas V2V y V2I, que tenga en cuenta las condiciones de propagación en los escenarios vehiculares, con el objeto de evaluar la capacidad potencial de las aplicaciones propuestas bajo el concepto ITS, donde el impacto del canal tendrá una gran importancia.

Por otra parte, en 2007 el ETSI designó para Europa la banda de 5,9 GHz o banda DSRC (*Dedicated Short-Range Communications*), adoptada previamente por ASTM e IEEE en el estándar ASTM E2213-03 para aplicaciones ITS [8]. Sin embargo, en Japón se ha asignado también la banda de 700 MHz (10 MHz entre 715-725 MHz) para aplicaciones ITS [9], [10]. La presente Tesis Doctoral está centrada en la caracterización en banda estrecha del canal V2X a partir de medidas experimentales realizadas en las bandas de 700 MHz y de 5.9 GHz. En este sentido, la Tesis Doctoral viene a complementar los estudios ya realizados en la banda de 5.9 GHz y presenta los primeros resultados en la banda de 700 MHz [11].

1.1. Objetivos de la Tesis Doctoral

El objetivo principal de la investigación es la caracterización experimental de las pérdidas de propagación del canal V2X en base a extensas medidas realizadas en las bandas de 5,9 GHz y 700 MHz. Este objetivo se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar e implementar: i) un sistema de medida (sonda de canal), a 5,9 GHz y 700 MHz, con el que se pueda obtener la información necesaria para el análisis de los parámetros que caracterizan los canales de propagación vehicular de banda estrecha y ii) un software que permita automatizar la adquisición de los datos medidos por la sonda de canal.
2. Realizar una extensa campaña de medidas en varios escenarios de propagación, bajo diferentes condiciones (entornos de propagación y densidad de tráfico) para sistemas V2V y V2I, que permita validar y mejorar la precisión de los modelos de canal existentes. La sonda de canal desarrollada y la campaña de medidas deben planificarse adecuadamente para poder analizar las pérdidas de propagación y el efecto de variabilidad temporal (*fading*) debido al efecto multicamino.
3. Realizar un análisis de los parámetros que caracterizan el canal de propagación, en concreto lo referente al *path-loss* y *shadowing* a partir del procesado de las medidas obtenidas. el análisis debe ir orientado a diferenciar

entre condiciones de propagación con visión directa (LOS, Line-of-Sight) y no visión directa (NLOS, non-LOS)

4. Proponer modelos de canal que permitan describir el comportamiento del *path-loss* en los diferentes escenarios de propagación vehicular y que puedan ser implementados de manera sencilla en simuladores de redes vehiculares. Los modelos tendrán en cuenta: i) tipo de escenario, ii) densidad de tráfico rodado y iii) sentido de desplazamiento.

1.2. Organización de la Tesis Doctoral

La Tesis está organizada en 6 capítulos. En el Capítulo 2 se describe la base teórica que fundamenta el proceso de diseño y configuración del sistema, así como también el análisis de los registros de datos obtenidos en la campaña de medidas. En este sentido, en la primera sección y parte de la segunda se ha llevado a cabo una descripción analítica de los parámetros que se han de considerar en la caracterización del canal de propagación. A continuación se describen las técnicas de medida de canal y se presenta un estado del arte de las campañas de medidas en escenarios vehiculares de acuerdo con la literatura disponible. También se describen los parámetros a analizar en la caracterización de canales vehiculares de banda estrecha, ilustrando los modelos de pérdidas de propagación utilizados por algunos autores y los modelos para el análisis del espectro Doppler. Por último se describen las estadísticas de desvanecimiento, mostrando los resultados presentados por algunos investigadores.

En el Capítulo 3 se describen los elementos, equipos y parámetros de configuración utilizados en la sonda de canal a 700 MHz y 5,9 GHz. A continuación se muestra el diseño del balance de potencias para los casos analizados en nuestro estudio, es decir, en comunicaciones V2V y V2I a 700 MHz y 5,9 GHz, teniendo en cuenta todas las variables que intervienen en el mismo, con el propósito de evaluar la variación de las pérdidas de propagación medias con respecto a los valores de potencia obtenidos en el análisis y procesado de los registros medidos. También se describen los escenarios de propagación de la ciudad de Valencia donde se ha llevado a cabo la campaña de medidas planificada, clasificados en urbano de alta densidad de tráfico rodado, urbano de baja densidad de tráfico rodado, suburbano, rural y de autovía. Por último se muestra el proceso de calibración experimental que se ha realizado analizando algunos registros medidos bajo unas condiciones particulares del escenario de propagación, polígono industrial y entorno rural, con los que se ha llevado a cabo una comparación del modelo a dos rayos, el cual se ajusta muy bien a los valores de pérdidas obtenidos al procesar dichos registros.

En el Capítulo 4 se propone un marco de referencia, presentando la metodología a seguir para el análisis de los registros obtenidos en la campaña

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

de medidas, referentes a la caracterización experimental del canal de propagación V2V. A continuación se han incluido los resultados experimentales de los parámetros del modelo de pérdidas de propagación para cada uno de los métodos de análisis, clasificándolos por escenario de propagación. Por último se realiza un análisis de los resultados experimentales obtenidos comparándolos con resultados presentados por otros investigadores en la literatura disponible.

En el Capítulo 5 se describe la metodología utilizada para el análisis de los registros obtenidos en la campaña de medidas, referente a la caracterización experimental del canal de propagación V2I. A continuación se presentan los resultados experimentales de los parámetros del modelo de pérdidas de propagación para escenarios urbano de alta densidad de tráfico rodado y de autovía. Por último se realiza un análisis de los resultados obtenidos comparándolos con resultados presentados por otros investigadores en la literatura disponible.

La Tesis Doctoral concluye con el Capítulo 6, donde se presentan las conclusiones más importantes derivadas del trabajo de investigación. Asimismo, se presentan las futuras líneas de investigación como continuación del trabajo realizado.

1.3. Principales aportaciones y publicaciones

En esta tesis doctoral se ha implementado una sonda de canal a 700 MHz y 5,9 GHz, con un proceso automatizado de las medidas, lo que ha permitido realizar una extensa campaña de medias en escenarios potenciales para comunicaciones vehiculares y las aplicaciones propuestas bajo el concepto ITS.

Se han realizado medidas en escenarios urbano de alta densidad de tráfico rodado, urbano de moderada/baja densidad de tráfico rodado, suburbano, rular y en autovías. A partir de esta campaña de medidas se ha llevado a cabo un análisis detallado del comportamiento de los parámetros que caracterizan el canal vehicular en lo que al *path-loss* hace referencia. Lo cual nos ha permitido aportar no solo valores medios de los parámetros del modelo de pérdidas de propagación para cada uno de los escenarios donde se han llevado a cabo las medidas, sino también el margen de variación de los mismos.

Se han propuesto varios métodos de análisis de los registros de datos obtenidos en la campaña de medidas, buscando comparar y mejorar la precisión de los resultados obtenidos, con el objeto de proporcionar los parámetros del modelo de pérdidas de propagación que mejor se ajusten a las condiciones de cada uno de los escenarios analizados.

Se ha propuesto un método de análisis con el cual se ha realizado una clasificación de las condiciones de propagación en visión directa y no visión directa. Los resultados sugieren la necesidad de tener en cuenta esta clasificación dado que las bandas de dispersión del exponente de pérdidas de propagación se en-

1.3 Principales aportaciones y publicaciones

cuentran en rangos diferentes. Se deben tener en cuenta estas consideraciones a la hora de implementar aplicaciones bajo este tipo de redes vehiculares.

Se ha llevado a cabo un análisis del comportamiento del exponente de pérdidas en función de la altura del Tx para el caso de comunicaciones V2I. Se proponen valores de ajuste de compensación a las alturas de las antenas del Tx y Rx de acuerdo con los modelos de propagación utilizados por algunos investigadores en este tipo de comunicaciones V2I.

El desarrollo de la tesis doctoral nos ha permitido presentar algunos resultados obtenidos en diferentes medios de divulgación científica. A continuación se describen las publicaciones realizadas hasta el momento como resultado del proyecto de investigación.

Publicación en revistas listadas en JCR

1. Título del artículo: *Path Loss Characterization for Vehicular Communications at 700 MHz and 5.9 GHz Under LOS and NLOS Conditions.*

Autores: H. Fernandez, L. Rubio, V. Rodrigo, J. Reig.

Transaction/Journal: IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Volume: 13, Issue: 1.

Digital Object Identifier: 10.1109/LAWP.2014.2322261.

ISSN 1536-1225.

Factor de impacto: 1.667.

2. Título del artículo: *Path Loss Modeling for Vehicular System Performance and Communication Protocols Evaluation.*

Autores: H. Fernandez, L. Rubio, J. Reig, V. Rodrigo, A. Valero.

Transaction/Journal: Mobile Networks and Applications December 2013, Volume 18, Issue 6, pp 755-765.

Digital Object Identifier: 10.1007/s11036-013-0463-x.

Print ISSN 1383-469X.

Online ISSN 1572-8153.

Factor de impacto: 1.109.

Publicación en revistas con ISSN

1. Título del artículo: *Caracterización de las pérdidas de propagación en el canal de radio V2V para un escenario suburbano.*

Autores: H. Fernandez, L. Rubio, V. Rodrigo, J. Reig.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Transaction/Journal: Tecnura Volumen 17 Numero 37 paginas 64 - 73
Julio - Septiembre de 2013.

ISSN 0123-921X.

2. Titulo del artículo: *Vehicular-to-Vehicular Channel Characterization and Measurement Results*.

Autores: A. Campuzano, H. Fernandez, D. Balaguer, A. Vila, B. Bernanrdo, V. Rodrigo, J. Reig, A. Valero, L. Rubio.

Transaction/Journal: Waves - 2012 - year 4.

ISSN 1889-8297.

Capítulo de libro

1. Titulo del capítulo: *Propagation aspects in vehicular networks*.

Autores: L. Rubio, J. Reig, H. Fernandez.

Publicado en: in the book Vehicular Technologies: Increasing Connectivity INTECH 2011, Editor Miguel Almeida

ISBN 978-953-307-223-4.

Congresos internacionales

1. Titulo del artículo: *Path loss characterization in vehicular environments under LOS and NLOS conditions at 5.9 GHz*.

Autores: H. Fernandez, V. Rodrigo, L. Rubio, J. Reig.

Publicado en: The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), in The Hague, The Netherlands, on 6-11 APRIL 2014.

2. Titulo del artículo: *A survey of channel measurement techniques and narrowband channel parameters for vehicular communications*.

Autores: H. Fernandez, S. Avella, A. Campuzano, D. Balaguer, V. Rodrigo, J. Reig, L. Rubio.

Publicado en: Communications Conference (COLCOM), 2012 IEEE Colombian.

Digital Object Identifier: 10.1109/ColComCon.2012.6233648.

ISBN 978-1-4673-1267-7.

Congresos nacionales

1. Titulo del artículo: *Caracterización de las pérdidas de propagación a 700 MHz y 5.9 GHz para comunicaciones vehiculares*.

Autores: H. Fernandez, V. Rodrigo, J. Reig, L. Rubio.

A publicar en: XXIX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. URSI 2014, Valencia del 3 al 5 de septiembre de 2014.

1.3 Principales aportaciones y publicaciones

2. Titulo del artículo: *Caracterización de las pérdidas de propagación en escenarios vehiculares bajo condiciones LOS y NLOS a 700 MHz y 5.9 GHz.*
Autores: H. Fernandez, V. Rodrigo, J. Reig, L. Rubio.
Publicado en: XXVIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. URSI 2013, Santiago de Compostela del 11 al 13 de septiembre de 2013.
ISBN 978-84-941537-1-6.
3. Titulo del artículo: *Caracterización experimental en banda estrecha del canal radio vehicular-to-vehicular (V2V) a 5.9 GHz.*
Autores: A. Campuzano, H. Fernandez, D. Balaguer, V. Rodrigo, J. Reig, L. Rubio.
Publicado en: XXVII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. URSI 2012, Elche del 12 al 14 de septiembre de 2012.
ISBN 978-84-695-4326-9.
4. Titulo del artículo: *Aspectos sobre la variabilidad temporal y dispersión en frecuencia del canal radio para comunicaciones Vehiculares.*
Autores: H. Fernandez, D. Balaguer, X. Part, J. Reig, L. Rubio.
Publicado en: XXVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. URSI 2011, Leganes del 7 al 9 de septiembre de 2011.
ISBN 978-84-933934-5-8.
5. Titulo del artículo: *Sistemas de comunicaciones vehiculares: Tecnologías y retos.*
Autores: X. Part, J. Reig, L. Rubio, H. Fernandez.
Publicado en: XX Jornadas Telecom I+D (TI+D 2010), Valladolid del 27 al 29 de septiembre 2010.
ISBN 978.84.89900.38.7.
6. Titulo del artículo: *Caracterización estadística del canal UWB en un entorno de laboratorio.*
Autores: H. Fernandez, L. Rubio, G Llano, J. Reig.
Publicado en: XXV Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. URSI 2010, Bilbao del 15 al 17 de septiembre de 2010.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Finalmente, indicar que este trabajo de investigación ha sido financiado en parte por el Programa de Apoyo a la Investigación y desarrollo de la Universitat Politècnica de València (PAID-05-10) y el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS en Colombia.

Capítulo 2

Caracterización del canal radio vehicular

En sistemas de comunicaciones inalámbricos, las señales se propagan desde el transmisor (Tx) hasta el receptor (Rx) por diferentes trayectos, lo que hace que en el Rx se reciban múltiples contribuciones o replicas de la señal transmitida, las cuales habrán sufrido distintos procesos de dispersión (*scattering*) y difracción. Dada la diferencia en los trayectos recorridos por cada una de las contribuciones, estas llegan a la antena receptora con ángulos de incidencia, atenuación, desfases y retardos de propagación diferentes dando lugar a un desvanecimiento, es decir, reducción del nivel de potencia con respecto a la potencia media con el tiempo. Todos estos efectos de la propagación por radio se pueden estudiar y analizar a través de la respuesta al impulso del canal, (CIR, *Channel Impulsive Response*), la cual se puede interpretar como la superposición de las contribuciones de todas las componentes multitrayecto (MPCs, *Multipath Components*). Conviene resaltar que los cambios en el canal de propagación debido al movimiento del Tx, el Rx o de los dispersores que se encuentren alrededor provocan que dicha respuesta al impulso sea variante en el tiempo.

Sin embargo, resulta enormemente complejo trabajar directamente con una secuencia de respuestas al impulso. Por este motivo, se han venido derivando y adoptando ampliamente, varias métricas de estadísticas del canal, las cuales proporcionan una caracterización más condensada, tales como, el *path-loss*, las estadísticas del desvanecimiento, el ensanchamiento Doppler y el ensanchamiento de retardo [5].

En la sección 2.1 se realiza una descripción de los parámetros que caracterizan los canales de propagación inalámbricos por medio de la CIR, analizando el comportamiento dispersivo del canal en el tiempo y la frecuencia. En la

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

sección 2.3 se presenta un estado del arte de los parámetros que modelan los canales vehiculares de banda estrecha, ilustrando algunos de los resultados más relevantes de acuerdo a la literatura disponible.

2.1. Caracterización del canal de propagación

Los parámetros más importantes utilizados para describir los canales de comunicación inalámbricos, en sentido determinista o estadístico, se pueden derivar a partir de la CIR: es decir, se puede introducir la CIR de un canal variante en el tiempo, como base para realizar una descripción completa del comportamiento dispersivo del canal tanto en el tiempo como en la frecuencia.

En un entorno variable en el tiempo caracterizado por la propagación multitrayecto, la señal recibida puede expresarse como una superposición temporal de réplicas de la señal transmitida (contribuciones procedentes de reflectores y difusores) con diferentes retardos y atenuaciones. Si la señal paso banda transmitida, definida como $s(t)$, es

$$s(t) = \text{Re}\{s_p(t)e^{j2\pi f_c t}\}, \quad (2.1)$$

donde $s_p(t)$ es la envolvente compleja y f_c la frecuencia portadora, la señal paso banda recibida, definida como $r(t)$, viene dada por

$$\begin{aligned} r(t) &= \text{Re} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} a_{k,i} s_p(t - \tau_i) e^{j2\pi(f_c + f_d \cos \theta_{k,i})t + \phi_{k,i}} \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ \left[\sum_{i=1}^{\infty} h(t, \tau_i) \delta(t - \tau_i) \otimes s_p(t) \right] e^{j2\pi f_c t} \right\} \\ &= \text{Re} \{ [h(t, \tau) \otimes s_p(t)] e^{j2\pi f_c t} \}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

donde

$$h(t, \tau_i) = \sum_{k=0}^{\infty} a_{k,i} e^{j2\pi f_d \cos \theta_{k,i} t + \phi_{k,i}}, \quad (2.3)$$

y

$$h(t, \tau) = \sum_{i=0}^{\infty} h(t, \tau_i) \delta(t - \tau_i), \quad (2.4)$$

donde $a_{k,i}$ y $\phi_{k,i}$ son la amplitud y la fase de la i -ésima contribución que llega al Rx con un ángulo $\theta_{k,i}$ respecto a la dirección de movimiento, y con un

2.1 Caracterización del canal de propagación

retardo τ_i . El término f_d es la frecuencia Doppler máxima, también llamada desplazamiento Doppler, es decir, $f_d = v/\lambda_c$; donde v es la velocidad del Rx, $\lambda_c = c_0/f_c$ es la longitud de onda asociada a la frecuencia portadora f_c , y c_0 es la velocidad de la luz. La función $\delta(\cdot)$ es la delta de Dirac y \otimes representa el operador de convolución. La Ec. (2.4) corresponde a la la respuesta al impulso variante en el tiempo de un canal inalámbrico. En concreto, $h(t, \tau)$ es la respuesta equivalente paso bajo del canal en el instante de tiempo t para un impulso generado τ segundos antes [12]. La función $h(t, \tau)$ se le conoce como *delay spread* a la entrada, y es una de las cuatro funciones del sistema descritas por Bello [13], la cual se utiliza para caracterizar por completo canales radio lineales variantes en el tiempo (LTV, *Linear Time Variant*). El término $h(t, \tau_i)$, es el coeficiente complejo dependiente del tiempo asociado a un retardo τ_i , y puede ser expresado como

$$h(t, \tau_i) = h_{iR}(t) + jh_{iQ}(t), \quad (2.5)$$

donde

$$h_{iR}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_{k,i} \cos(j2\pi f_d \cos \theta_{k,i} t + \phi_{k,i}), \quad (2.6)$$

y

$$h_{iQ}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_{k,i} \sin(j2\pi f_d \cos \theta_{k,i} t + \phi_{k,i}), \quad (2.7)$$

son las componentes en fase y en cuadratura, respectivamente.

En la práctica, muchos canales físicos se pueden considerar estacionarios en un periodo de tiempo corto, o lo que es equivalente en desplazamientos cortos de los terminales. Aunque estos canales pueden no serlo necesariamente, normalmente se les considera estacionarios en sentido amplio (WSS, *Wide Sense Stationary*). Asimismo, un canal puede mostrar dispersión incorrelada (US, *Uncorrelated Scattering*) en la variable temporal, es decir, contribuciones con diferentes retardos se encuentran incorreladas. La combinación entre las suposiciones WSS y US da origen a la suposición de canales WSSUS, los cuales han sido muy utilizados para modelar los sistemas celulares. Bajo la suposición WSSUS, el canal se puede representar como una línea de retardo ajustable (TDL, *Tapped Delay Line*), donde la CIR se escribe como

$$h(t, \tau) = \sum_{i=1}^N h_i(t) \delta(\tau - \tau_i), \quad (2.8)$$

donde $h_i(t) \triangleq h(t, \tau_i)$ se refiere a la amplitud compleja del i -ésimo tap. Utilizando esta representación para la CIR, y teniendo en cuenta la Ec. (2.3),

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

cada uno de los N taps se corresponde con un grupo de MPCs con un retardo espaciado muy reducido. Esta representación se emplea a menudo en teoría de caracterización de canal porque la resolución temporal del Rx no es suficiente para procesar todas las MPCs en la mayoría de los casos prácticos. Es interesante destacar que el número de taps, N , y los retardos asociados a las MPCs para el i -ésimo tap, τ_i , permanecen constantes durante un corto periodo de tiempo, donde la suposición de WSS es válida. Por esta razón, N y τ_i no son dependientes de la variable tiempo en la Ec. (2.8). La Fig. 2.1 muestra un gráfico representativo del modelo de canal TDL basado en elementos de retardo [12], [14].

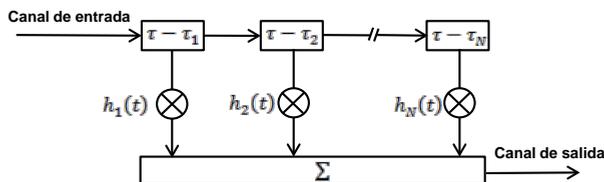


Figura 2.1: Descripción del modelo de canal TDL basado en elementos de retardo.

La variación temporal de la amplitud compleja de los taps se debe a las fases relativas de las MPCs que cambian con el tiempo para desplazamientos cortos, en términos de longitud de onda, del Tx/Rx y/u objetos que interactúan. De ese modo, $h_i(t)$ se le conoce en la literatura como la envolvente compleja de desvanecimiento (*fading complex envelope*) del i -ésimo trayecto. La variación temporal de $h_i(t)$ se modela a través de distribuciones Rayleigh, Rice o Nakagami- m , entre otras.

El comportamiento dispersivo en los dominios del tiempo y la frecuencia de cualquier canal inalámbrico condiciona las técnicas de transmisión diseñadas para mitigar los problemas del canal y limita el rendimiento del sistema. Por ejemplo, la dispersión temporal (o selectividad en frecuencia) obliga a implementar técnicas de ecualización, y la dispersión en frecuencia (o selectividad en tiempo) fuerza a usar técnicas de diversidad y ecualización adaptativa. La multiplexación por división en frecuencia ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) ha sido propuesta en el estándar IEEE 802.11p. En un sistema V2V basado en OFDM, la dispersión temporal limita la longitud mínima del prefijo cíclico, y la dispersión en frecuencia puede llegar a producir interferencia inter-portadora (ICI, *Inter-Carrier Interference*). A continuación se presentan los parámetros más importantes para describir el comportamiento de la dispersión en tiempo y frecuencia.

2.1.1. Parámetros de la dispersión en el tiempo

Es muy común en la teoría de caracterización de canales de banda ancha expresar la dispersión en el tiempo y en la frecuencia de un canal de propagación inalámbrico por medio de la función de dispersión (*scattering function*), que se expresa por $P_s(\tau, \nu)$, donde ν es la variable que se refiere al desplazamiento Doppler.

El perfil de retardo de potencia (PDP, *Power Delay Profile*), se puede obtener a partir de $P_s(\tau, \nu)$, integrando la función de dispersión sobre la variable de desplazamiento Doppler, es decir

$$P_h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P_s(\tau, \nu) d\nu. \quad (2.9)$$

A partir de medidas de canal de la CIR en un medio particular, y asumiendo ergodicidad, el PDP se puede estimar para propósitos prácticos como

$$P_h(\tau) = E_t \{ |h(t, \tau)|^2 \}, \quad (2.10)$$

donde $E_t\{\cdot\}$ representa el operador esperanza en la variable tiempo. De la Ec. (2.10), el PDP se puede ver como magnitud cuadrática de la CIR, promediada en períodos de tiempo cortos o pequeñas áreas locales alrededor del Rx (efecto a pequeña escala).

El parámetro más importante para caracterizar el efecto de la dispersión temporal del canal es el valor cuadrático medio del ensanchamiento de retardo (*root mean square delay spread*), que se expresa como τ_{rms} , el cual corresponde al segundo momento central del PDP, expresado como

$$\tau_{rms} \triangleq \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (\tau - \bar{\tau})^2 P_h(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} P_h(\tau) d\tau}}, \quad (2.11)$$

donde $\bar{\tau}$ es el valor medio del ensanchamiento de retardo, o el primer momento central del PDP, dado por

$$\bar{\tau} \triangleq \frac{\int_0^{\infty} \tau P_h(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} P_h(\tau) d\tau}. \quad (2.12)$$

Otros parámetros para describir el ensanchamiento de retardo de los canales inalámbricos son el ensanchamiento de retardo máximo, la ventana de retardo y el intervalo de retardo [12].

El ensanchamiento de retardo es una medida de la memoria del canal y determina el ancho de banda de coherencia, expresado como B_c , el cual es un parámetro para medir la selectividad en frecuencia del canal. Físicamente, B_c representa el ancho de banda en el cual el canal tiene aproximadamente un comportamiento de respuesta plana en frecuencia. Existe una relación inversa

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

entre el valor cuadrático medio del ensanchamiento de retardo y el ancho de banda de coherencia, es decir, $B_c \propto 1/\tau_{rms}$.

2.1.2. Parámetros de la dispersión en frecuencia

Cuando un canal presenta variabilidad temporal, la señal recibida sufre desvanecimientos selectivos en el tiempo y como resultado también experimenta dispersión en frecuencia.

De manera similar que con el PDP, la densidad espectral de potencia Doppler (DPDS, *Doppler Power Density Spectrum*), expresada por $P_H(\nu)$, se puede obtener integrando la función de dispersión sobre la variable retardo, es decir

$$P_H(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} P_s(\tau, \nu) d\tau. \quad (2.13)$$

A partir del DPDS, se pueden definir algunos parámetros que describen el comportamiento dispersivo en frecuencia del canal. El parámetro más importante es el valor cuadrático medio del ensanchamiento Doppler, expresado como ν_{rms} , dado por

$$\nu_{rms} \triangleq \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (\nu - \bar{\nu})^2 P_H(\nu) d\nu}{\int_0^{\infty} P_H(\nu) d\nu}}, \quad (2.14)$$

donde $\bar{\nu}$ es el valor medio del ensanchamiento Doppler o el primer momento central del DPDS, dado por

$$\bar{\nu} \triangleq \frac{\int_0^{\infty} \nu P_H(\nu) d\nu}{\int_0^{\infty} P_H(\nu) d\nu}. \quad (2.15)$$

De manera similar que con el B_c , para un canal variante en el tiempo se puede definir un parámetro llamado tiempo de coherencia, expresado como T_c para referirse al intervalo de tiempo en el cual el canal se puede considerar estacionario. Igualmente, existe una relación inversa entre el valor cuadrático medio del ensanchamiento Doppler y el tiempo de coherencia, dada por $T_c \propto 1/\nu_{rms}$.

2.2. Medidas en canales vehiculares

Las medidas de canal son esenciales para entender los fenómenos de propagación en escenarios específicos, y se pueden utilizar para validar y mejorar la precisión de los modelos de canal existentes. Un modelo de canal puede también incorporar resultados obtenidos con datos experimentales; es decir, los parámetros estimados en campañas de medidas pueden incluirse en el modelo de canal, dando lugar a un modelo geométrico.

2.2.1. Técnicas de medida de canal

Las medidas requieren de una determinada técnica o procedimiento, que depende de los parámetros a medir. La configuración de los equipos utilizados para medir la función de transferencia de un canal inalámbrico, en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, constituye una sonda de canal (*channel sounder*). La configuración e implementación de una sonda de canal está relacionada con los parámetros del canal a ser medidos. Así, las sondas de canal pueden ser clasificadas en banda estrecha (*narrowband*) y en banda ancha (*wideband*).

Las sondas de canal de banda estrecha tratan de identificar la ganancia del canal y los desplazamientos Doppler experimentados en la señal recibida al transmitir una señal de banda estrecha (portadora sin modular RF). Generalmente, los fenómenos de canal de banda estrecha considerados son el *path-loss*, efecto Doppler y estadísticas del desvanecimiento a corto y largo plazo (*small-and large-scale fading*). Una sonda de canal simple consiste en la transmisión de un tono a una única frecuencia de portadora y un Rx de banda estrecha (es decir, un medidor de potencia específicamente de banda estrecha o un analizador de espectro), para medir la potencia de la señal recibida. También se puede utilizar un analizador de señal vectorial (ASV) como Rx. Dado que la respuesta del canal se mide a una única frecuencia, la resolución temporal de una sonda de canal de banda estrecha es infinita. Esto quiere decir que no se puede distinguir las diferentes réplicas retardadas de la señal transmitida en el dominio del tiempo.

Cuando un sistema inalámbrico experimenta selectividad en frecuencia, o dispersión temporal, se necesita una caracterización de banda ancha para entender el comportamiento de la selectividad en frecuencia del canal. Este es el caso de los futuros sistemas de comunicaciones de corto alcance (DSRC, *Dedicated Short Range Communications*), los cuales utilizan un ancho de banda de canal mínimo de 10 MHz. Para estimar las métricas de la dispersión temporal, es necesaria la utilización de una sonda de canal de banda ancha. Las sondas de canal de banda ancha pueden medir la respuesta del canal en frecuencia (función de transferencia del canal de propagación), para el instante t_0 , simbolizada por $T(f, t_0)$. Asimismo, la CIR, se estima aplicando la transformada inversa de Fourier con respecto a la variable f , quedando $h(t_0, t)$. Un analizador de redes vectorial (ARV) se puede utilizar para estimar la respuesta del canal en frecuencia, a partir del parámetro de dispersión S_{21} , donde el dispositivo bajo medida es el conjunto formado por el canal de propagación y las antenas de transmisión y recepción. Sin embargo, cuando se utiliza un ARV, la respuesta en frecuencia medida tiene en cuenta la respuesta del canal y la respuesta en frecuencia de las antenas transmisora y receptora, por lo que se hace necesario un proceso de calibración para extraer el efecto de las antenas.

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

Los mayores inconvenientes que presentan los ARV son que el canal debe ser estacionario durante el tiempo de adquisición de la respuesta en frecuencia, es decir, el tiempo de adquisición debe ser menor que el T_c , del canal. Asimismo, la distancia de separación Tx/Rx, desde la antena transmisora y la antena receptora, debe ser reducida puesto que las antenas se deben conectar al ARV. Debido a estos inconvenientes, un ARV no suele utilizarse en las medidas de canales vehiculares. El ARV se usa normalmente como una sonda de canal de banda ancha para medir la CIR para distancias cortas, es decir, escenarios de interior (*indoor*). Una alternativa consiste en transmitir una señal multiportadora con amplitudes y fases relativas conocidas, y como Rx utilizar un ASV para estimar el espectro de frecuencia.

En el dominio del tiempo, la CIR se mide directamente. Existen dos posibles implementaciones de sonda de canal de banda ancha en el dominio del tiempo. La primera implementación consiste en usar un generador de impulsos en el Tx y un osciloscopio digital en el Rx, dando como resultado la llamada sonda de canal al impulso. El principal inconveniente de una sonda de canal al impulso es que se necesita una antena adicional de referencia para el pulso de disparo. Las sondas de canal al impulso se han usado en medidas de canal para banda ultra ancha (UWB, *Ultra-Wideband*). La segunda implementación de una sonda de canal de banda ancha en el dominio del tiempo consiste en la transmisión de una secuencia de ruido pseudo-aleatorio (PN, *Pseudo-random Noise*) de banda ancha. En una secuencia PN, los símbolos transmitidos son llamados chips y a la técnica PN se le conoce en la literatura como (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*). La respuesta al impulso se estima como la correlación cruzada entre la señal recibida y la secuencia PN transmitida, dando como resultado la sonda de canal por correlación. La Fig. 2.2 muestra el principio de operación de una sonda de canal basada en el método de correlación. La sonda de canal por correlación se utiliza normalmente en medidas de banda ancha, especialmente en medidas de canales vehiculares. La resolución temporal de una sonda de canal por correlación y el retardo máximo alcanzable están relacionados con la duración del chip y la longitud de la secuencia PN, respectivamente.

En la práctica, la sonda de canal basada en el método de correlación más simple consiste en un generador de forma de onda arbitrario (WG, *Wave Generator*) como Tx y un ASV como Rx. El WG transmite una secuencia PN, el ASV captura las componentes en fase y cuadratura de la señal recibida y entonces tras el post-procesado se estima la respuesta al impulso del canal.

Una sonda de canal de banda ancha se puede utilizar también con múltiples antenas en el Tx y Rx para analizar aspectos relacionados con el carácter direccional del canal de propagación. Por ejemplo, los grados de correlación entre la señal recibida en cada antena elemental utilizando diversidad espacial y técnicas MIMO, *Multiple-Input Multiple-Output*, hace referencia a múltiples antenas en transmisión/recepción. Para una completa caracterización del canal

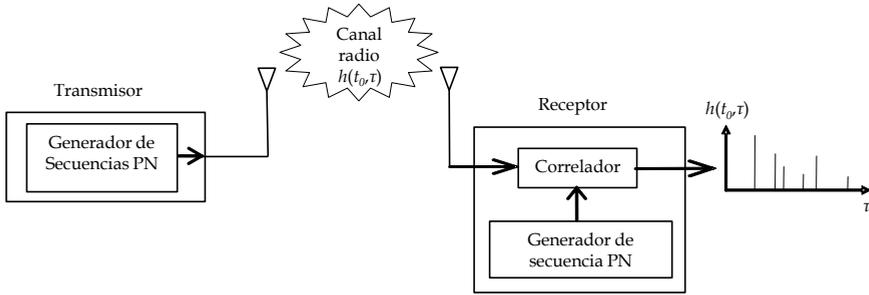


Figura 2.2: Sonda de canal correlativa basada en el principio de señal PN.

utilizando MIMO, se requiere conocer la dirección de llegada de las réplicas multitrayecto al Rx y la dirección de salida en el Tx. Independientemente de la técnica de medida (banda ancha o banda estrecha y dominio del tiempo o dominio de la frecuencia), los parámetros del canal estimados a partir de las medidas dependen de la configuración de la medida, especialmente por el carácter direccional de las antenas. La influencia de la configuración de la medida no siempre se puede separar fácilmente de la respuesta al impulso del canal.

2.2.2. Campañas de medida en escenarios vehiculares

En los últimos seis años, varias campañas de medidas se han centrado en investigar las características del canal para diferentes entornos y frecuencias. La Tabla 2.1 resume las campañas de medidas más representativas [15], indicando la frecuencia de portadora, la técnica de medida (banda estrecha o banda ancha), el tipo de antenas (SISO, *Single-Input Single-Output*, hace referencia a una única antena en transmisión/recepción y MIMO), el enlace de propagación medido (V2V, V2I o V2X) y el entorno donde se llevaron a cabo.

De acuerdo con la distancia de separación Tx/Rx los escenarios V2X se pueden clasificaren entornos de gran escala (LSS, *Large Spatial Scale*), moderada escala (MSS, *Moderate Spatial Scale*) y pequeña escala (SSS, *Small Spatial Scale*). Para escenarios LSS la distancia es normalmente mayor a 1 km.; para escenarios MSS la distancia va desde 300 m. a 1 km. y para escenarios SSS la distancia es menor a 300 m. Sin embargo, la mayoría de aplicaciones V2X se encuentran en escenarios MSS y SSS; luego un elevado porcentaje de campañas de medidas se han realizado en estos escenarios. Asimismo los escenarios V2X pueden clasificarse en urbano, suburbano, rural, autopistas y carreteras, en términos del entorno que los rodea, (edificios, puentes, arboles, parques, coches, etc., localizados en la vía); es una clasificación general para facilitar

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

las comparaciones entre los resultados empíricos. Para conocer las características específicas del entorno donde fueron realizadas las campañas de medida el lector puede dirigirse a las referencias correspondientes.

Las bandas de frecuencia corresponden a las definidas en los estándares IEEE 802.11b/g (banda de 2,4 GHz), IEEE 802.11a (banda de 5,2 GHz) y la DSRC (banda de 5,9 GHz). De igual manera, en numerosas campañas de medida se han utilizado configuraciones SISO [16],[17]-[24]. Sin embargo las tecnologías MIMO están ganando mucha importancia en los estándares IEEE 802.11 y pueden llegar a ser muy interesantes para los sistemas V2V. Hasta ahora se han realizado pocas campañas de medida [25]-[29] para canales V2V MIMO.

Por otra parte, el conocimiento de las estadísticas del canal (distribución de amplitud y densidad espectral de potencia Doppler), es esencial para el análisis y diseño de un sistema de comunicaciones. En este sentido varias campañas de medida [16],[17],[20],[25] se han orientado a estudiar las características estadísticas del canal para diferentes tipos de entorno. Solo una campaña de medidas recogida en [16] ha llevado a cabo un estudio del impacto de la densidad de tráfico vehicular (VTD, *Vehicular Traffic Density*) en autopistas para escenarios MSS y SSS. Asimismo, las direcciones de desplazamiento entre el Tx y Rx afectan las estadísticas del canal (Efectos Doppler). Varias campañas de medida [16],[17],[21],[25],[29] se han planificado para analizar las características del canal cuando el Tx y Rx se desplazan en la misma dirección y mismo sentido. Sin embargo, en muy pocas campañas de medidas [20],[26],[29] se han investigado las características del canal cuando el Tx y Rx se desplazan en sentido opuesto.

Por lo tanto, en la actualidad los esfuerzos de los investigadores en el ámbito de las comunicaciones vehiculares se centran en llevar a cabo campañas de medidas con las siguientes características: 1. En 5,9 GHz, para el mejor diseño de aplicaciones de seguridad en sistemas V2V siguiendo el estándar IEEE802.11p. 2. En canales V2V MIMO de banda ancha, para el futuro desarrollo de los sistemas V2V. 3. En diferentes VTD, ya que esta es una de las características que afecta significativamente las estadísticas de canal en entornos V2V, especialmente en escenarios MSS y SSS. 4. Cuando el Tx y Rx se mueven en sentido opuesto.

2.3. Caracterización de canales V2X de banda estrecha

El efecto de la propagación a pequeña escala como resultado de la suma, constructiva o destructiva, de los MPCs es llamado desvanecimiento. Este desvanecimiento se caracteriza por lo general con modelos estadísticos debido a

2.3 Caracterización de canales V2X de banda estrecha

Referencia	Frecuencia GHz	Sonda de canal	Configuración del sistema	Enlace de propagación	Entorno
[17]	2,4	BA	SISO	V2V	SU,A
[25]	2,4	BA	MIMO	V2V	C
[18]	5,0	BE	SISO	V2V	U
[16]	5,0	BA	SISO	V2V	U,SU,A,C
[26]	5,2	BA	MIMO	V2X	U,R,C
[19]	5,2	BE	SISO	V2V	U,SU,A,C
[27]	5,3	BA	MIMO	V2V	U,SU,C
[28]	5,7	BA	MIMO	V2V	U
[20]	5,9	BA	SISO	V2X	U,SU,A
[21]	5,9	BE	SISO	V2V	SU
[22]	5,9	BA	SISO	V2V	SU,R,C
[23]	5,9	BA	SISO	V2X	U,R,C
[24]	5,9	BA	SISO	V2V	U,R,C
[29]	5,2	BA	MIMO	V2V	U,SU,R,C

Tabla 2.1: Medidas de canal vehicular. BE:Banda estrecha, BA:Banda ancha, U:Urbano, SU:Suburbano, R:Rural, A:Autopista, C:Carretera.

que los objetos reflectores y dispersores del entorno se encuentran en constante movimiento y su ubicación y naturaleza no son predecibles. Asimismo, el efecto de propagación a gran escala, el cual modela la variación de potencia de la señal dada la presencia de grandes obstáculos que obstruyen el trayecto entre el Tx y Rx, puede ser pequeño debido a las pequeñas escalas de distancia en canales vehiculares; lo que ocasiona que por lo general exista una componente LOS dominante.

Se considera canal de banda estrecha cuando el comportamiento del canal es uniforme en el ancho de banda de interés, lo que se conoce también como, canal con desvanecimiento plano. Asimismo la caracterización del canal radio de banda estrecha se centra en el análisis de la potencia media recibida y las estadísticas de de los desvanecimientos a pequeña escala.

A continuación se describen los parámetros para la caracterización de canales vehiculares de banda estrecha.

2.3.1. Path-loss

El *path-loss* o pérdidas de propagación, es uno de los parámetros más importantes para el diseño del enlace radio, proporcionando una medida de la calidad del canal. Se define como el nivel medio de las pérdidas de propagación en dB y varía en función de la distancia de separación Tx-Rx. El *path-loss* tiene en cuenta los mecanismos de propagación que existen en el canal radio, tales como espacio libre, reflexión, difracción y dispersión, la influencia del entorno de propagación (urbano, suburbano o rural), las características de direccionali-

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

dad, las alturas de las antenas y la distancia de separación Tx/Rx. Asimismo, la relación señal a ruido (SNR, *Signal-to-Noise*) está inversamente relacionada con el *path-loss*; es decir, al aumentar el *path-loss*, la SNR en el Rx se hace más pequeña, y por tanto se reduce el área de cobertura.

El valor medio de la potencia recibida en unidades logarítmicas (dBm), bajo condiciones de propagación en el espacio libre, simbolizado por $P_R(d)$, viene dado por la fórmula de transmisión de Friis como

$$P_R(d) = P_T + G_T + G_R - 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda_c} \right)^2, \quad (2.16)$$

donde d es la distancia de separación Tx/Rx, P_T es la potencia transmitida en dBm; G_T y G_R son las ganancias de la antena transmisora y receptora en dB en la dirección de propagación de la onda; y λ_c es la longitud de onda asociada a la frecuencia de portadora f_c . El último término en la Ec. (2.16) representa el *path-loss* para condiciones de propagación en el espacio libre, $PL_{FS}(d)$, expresado en decibelios (dB) como

$$PL_{FS}(d) = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda_c} \right)^2. \quad (2.17)$$

En condiciones de propagación diferentes al espacio libre, las pérdidas de propagación expresadas en dB, denominadas $PL(d)$, se pueden expresar como

$$PL(d) = L(d) + X_\sigma + Y, \quad (2.18)$$

donde $L(d)$ es el valor medio del *path-loss* en dB, y X_σ es una variable aleatoria gaussiana con media cero y desviación estándar σ . La variable X_σ modela la contribución del desvanecimiento a gran escala, mientras que Y modela la contribución del desvanecimiento a pequeña escala.

En varios modelos de canal, el valor medio del *path-loss* es proporcional al logaritmo de la distancia, es decir, $\overline{PL}(d) \propto 10\gamma \log_{10} d$, siendo γ el exponente de *path-loss*, extraído de los datos medidos del canal ($\gamma = 2$, para condiciones de espacio libre, según la Ec. (2.17)).

Existen diferentes modelos de *path-loss* propuestos en la literatura para enlaces de propagación V2I y V2V. A continuación se presentan algunos modelos de *path-loss* que pueden ser utilizados para la simulación de redes vehiculares ad hoc, (VANET, *Vehicular ad hoc networks*). A partir de ahora, a menos que sea indicado, el *path-loss* será expresado en dB; la distancia, altura de antenas y longitud de onda en metros; y la frecuencia en GHz.

2.3.1.1. Modelos de pérdidas para V2I

En las últimas décadas, se han realizando grandes esfuerzos para obtener modelos precisos de *path-loss* en microceldas para entornos urbanos densos. En

2.3 Caracterización de canales V2X de banda estrecha

estos modelos la antena transmisora se ubica varios metros sobre la superficie terrestre. Sin embargo, sólo los modelos que han considerado la banda DSRC pueden ser utilizados para estimar el *path-loss*, como es el caso del modelo de propagación urbano para micro-celdas desarrollado en el proyecto Europeo WINNER (*Wireless World Initiative New Radio*).

Modelo de *path-loss* para micro-celdas WINNER El modelo descrito en este apartado corresponde a una extensión del modelo B1 para microceldas [30]. Este modelo se basa en resultados de medidas de canal, considerando condiciones LOS y NLOS. El rango de frecuencia validado para el modelo es desde 2 hasta 6 GHz. Se trata de un modelo a dos pendientes con una altura efectiva h_0 , dada la presencia de vehículos entre el Tx y Rx, y una distancia crítica d_c , o *breakpoint*, estimada como

$$d_c = \frac{4h'_T h'_R}{\lambda_c}, \quad (2.19)$$

donde $h'_T = h_T - h_0$ y $h'_R = h_R - h_0$, con h_T y h_R como las alturas de la antena transmisora y receptora, respectivamente. Asimismo, h_0 está relacionada con las condiciones de tráfico, variando desde 0,5 (tráfico bajo) hasta 1,5 (tráfico alto), y para tráfico moderado $h_0 = 1$.

Tomando en cuenta lo anterior y si d es la distancia de separación Tx-Rx, se tiene que el valor medio del *path-loss* en condiciones LOS se expresa de la siguiente manera

$$\overline{PL}_{\text{LOS}}(d) = \begin{cases} 22,7 \log_{10} d + 41 + 20 \log_{10} \left(\frac{f_c}{5} \right) & d < d_c \\ 40 \log_{10} d + 41 - 17,3 \log_{10}(d_c) + 20 \log_{10} \left(\frac{f_c}{5} \right) & d \geq d_c \end{cases} \quad (2.20)$$

En este modelo se puede asumir un alcance máximo de varios kilómetros. Igualmente, para las alturas de las antenas transmisora y receptora se ha propuesto el siguiente rango: $5 \text{ m} < h_T < 20 \text{ m}$ y $1,5 \text{ m} < h_R < 20 \text{ m}$. De igual forma este modelo se puede aplicar para enlaces V2I si $h_T = h_{\text{RSU}}$ y $h_R = h_{\text{OBU}}$ donde h_{RSU} y h_{OBU} son las alturas de las antenas del Tx en el (RSU, *roadside unit*) y el Tx a bordo de los vehículos (OBU, *on-board unit*) respectivamente.

Por otra parte, El valor medio del *path-loss*, bajo condiciones NLOS, puede expresarse como

$$\overline{PL}_{\text{NLOS}}(d_1, d_2) = \overline{PL}_{\text{LOS}}(d = d_1) + 20 - 12,5n_j \log_{10}(d_2), \quad (2.21)$$

donde

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

$$n_j = \text{máx}\{2,8 - 0,0024d_1, 1,84\}. \quad (2.22)$$

La geometría del modelo de *path-loss* para microceldas WINNER en condiciones NLOS se muestra en la Fig. 2.3. En dicha figura, se ilustran las distancias d_1 y d_2 . La Ec. (2.21) es válida para $d_2 > W_s/2$, siendo W_s el ancho de la calle. Para $d_2 \leq W_s/2$, se puede aplicar el modelo LOS.

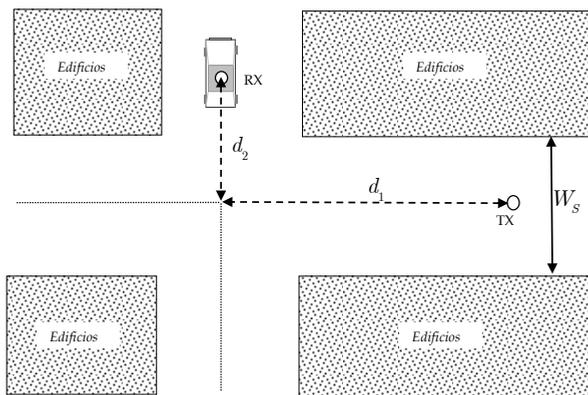


Figura 2.3: Geometría para el modelo de *path-loss* para microceldas NLOS WINNER.

2.3.1.2. Modelos de pérdidas para V2V

Las diferencias entre canales V2V y F2M obligan a desarrollar nuevos modelos para estimar el valor medio del *path-loss*. A continuación se describen los modelos a una y dos pendientes (*single- and dual-slope models*), indicando los valores de sus parámetros basados en diferentes medidas de canal en banda estrecha y banda ancha. De igual manera, se describe el modelo típico a dos rayos (*two-ray model*), y finalmente se presenta un modelo de *path-loss* desarrollado por la Universidad de Kangaku.

Modelos a una y dos pendientes El modelo convencional de *path-loss* a una pendiente presentado por los investigadores en [7] y [31], determina que dada una distancia de separación Tx-Rx, d , puede establecerse una relación lineal entre las pérdidas de propagación expresadas en unidades logarítmicas, $L(d)$, y $\log_{10}(d)$ en canales radio V2V de forma análoga a los tradicionales

2.3 Caracterización de canales V2X de banda estrecha

canales F2M, dada por

$$L(d) = L_0 + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + S, \quad d \geq d_0, \quad (2.23)$$

donde L_0 representa las pérdidas medias de propagación a una distancia d_0 , el término $10\gamma \log_{10}(d/d_0)$ hace referencia a las pérdidas medias de propagación referidas a una distancia Tx-Rx d_0 , γ es el denominado exponente de pérdidas, relacionado con el tipo de entorno de propagación, y S es una variable aleatoria con distribución Gaussiana de media cero y desviación típica σ_S , utilizada para modelar los desvanecimientos a largo plazo (*long-term fading* o *shadowing*).

Sin embargo, existen entornos en los cuales el modelo a dos pendientes se puede ajustar con mayor precisión a los datos medidos. El modelo a dos pendientes se caracteriza por un exponente de *path-loss* γ_1 y una desviación estándar σ_1 , por debajo de la distancia de referencia d_c y por un exponente de *path-loss* γ_2 y una desviación estándar σ_2 , por encima de dicha distancia de referencia. Utilizando este modelo, el valor medio de *path-loss* se puede escribir como

$$L(d) = \begin{cases} L_0 + 10\gamma_1 \log_{10}(\frac{d}{d_0}) & d_0 \leq d \leq d_c \\ L_0 + 10\gamma_1 \log_{10}(\frac{d_c}{d_0}) + 10\gamma_2 \log_{10}(\frac{d}{d_0}) & d > d_c \end{cases} . \quad (2.24)$$

Varios investigadores han encontrado parámetros diferentes para definir la distancia crítica d_c óptima. Por ejemplo en [32], d_c está basada en medidas y se estima como $d_c = 2\pi h_{Tx} h_{Rx} / \lambda_c$, donde h_T y h_R son las alturas de las antenas del Tx y Rx, respectivamente. Asimismo, en [33] se propone una distancia crítica diferente $d_c = 4h_{Tx} h_{Rx} / \lambda_c$, la cual es más exacta para enlaces V2V. Sin embargo, en la práctica, la distancia crítica se relaciona con las características de propagación del entorno, y por lo tanto, se tendrán diferencias importantes entre entornos urbanos, suburbanos, carreteras y áreas rurales. De forma similar al modelo de pérdidas de trayecto WINNER, donde la altura efectiva estaba definida teniendo en cuenta las condiciones del tráfico, en [34] los autores proponen una distancia crítica dada por

$$d_c = \frac{4(h_{Tx} - h_0)(h_{Rx} - h_0)}{\lambda_c}, \quad (2.25)$$

donde h_0 es una compensación a un valor de altura efectiva del terreno para modelar las diferentes condiciones de propagación. A partir de una campaña de medidas a 5,9 GHz en entorno urbano con alturas de antenas $h_{Tx} = 1,51$ m. y $h_{Rx} = 1,93$ m. del Tx y Rx, respectivamente, se ha derivado una distancia crítica $d_c = 100$ m., que proporciona como resultado un $h_0 = 0,57$.

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

En la Tabla 2.2 se resumen los valores del exponente de propagación *path-loss* y la desviación típica del *shadowing* o *long-term fading* (variaciones lentas en la media de la envolvente de la señal recibida), para los modelos de *path-loss* a una y dos pendientes, obtenidos de campañas de medida de canal realizadas en diferentes entornos vehiculares.

Parámetro	Urbano	Suburbano	Carretera	Rural
γ/σ (dB)	1,61/3,4 [24]	2,32/7,1 y 2,75/5,5 [21]	1,85/3,2 [24]	1,79/3,3 [24]
γ/σ (dB)	1,68/1,7 [29]	1,59/2,1 [29]	1,77/3,1 [29]	-
γ_1/σ_1 (dB)	-	2/5,6 y 2,1/2,6 [21]	1,9/2,5 [35]	2,3/3,2 [35]
γ_2/σ_2 (dB)	-	3,8/4,4 y 4/8,4 [21]	4/0,9 [35]	4/0,9 [35]
d_c (m)	-	100 [21]	220 [35]	226 [35]

Tabla 2.2: Parámetros para los modelos a una y dos pendientes generados de campañas de medida.

Modelo a dos rayos El modelo a dos rayos ha sido ampliamente utilizado en condiciones de LOS dado su simplicidad. De acuerdo con la definición clásica del modelo de propagación a dos rayos, el trayecto directo y la onda reflejada por la superficie terrestre pueden ser tomadas en cuenta para estimar el *path-loss* cuando se tiene LOS entre el Tx y Rx y no existen vehículos entre ellos. La geometría para el modelo de propagación a dos rayos se ilustra en la Fig. 2.4.

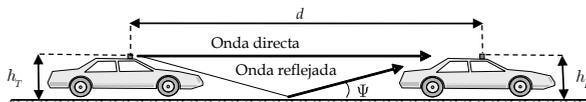


Figura 2.4: Geometría del modelo de propagación a dos rayos.

La superposición del trayecto directo con el trayecto reflejado en la antena receptora genera una ganancia de intensidad de campo representada por el término $|E_T/E_D|$, donde E_T y E_D son la intensidad de campo total y la intensidad del trayecto directo en la antena receptora, respectivamente. Para la geometría dada en la Fig. 2.4, el término $|E_T/E_D|$, se puede calcular como

$$|E_T/E_D| = \left| 1 + \rho_{\perp\parallel}(\Psi) \frac{d}{d + \Delta d} e^{(-jk\Delta d)} \sqrt{\frac{G_T(\theta_r, \varphi_r) G_R(\theta_r, \varphi_r)}{G_T(\theta_d, \varphi_d) G_R(\theta_d, \varphi_d)}} \right|, \quad (2.26)$$

donde $\rho_{\perp\parallel}$, es el coeficiente de reflexión de Fresnel de la superficie terrestre, para polarización vertical (\parallel) o polarización horizontal \perp , asociada a el ángulo de

2.3 Caracterización de canales V2X de banda estrecha

incidencia Φ ; con $k = 2\pi/\lambda_c$ como el número de onda, y Δd como la diferencia de longitudes entre el trayecto reflejado y el directo, que para $h_T, h_R \ll d$ puede estimarse como

$$\Delta d \approx \frac{2h_T h_R}{d}. \quad (2.27)$$

De igual manera, en la Ec. (2.26) se tiene en cuenta también el diagrama de radiación de las antenas transmisora y receptora, $G_T(\theta, \varphi)$ y $G_R(\theta, \varphi)$, respectivamente, donde (θ_d, φ_d) y (θ_r, φ_r) son las direcciones angulares asociadas a los trayectos directo y reflejado, respectivamente.

Cuando se calcula la Ec. (2.26), se realiza una evaluación rigurosa de la interferencia entre los trayectos directo y reflejado, la cual debe ser tenida en cuenta para trayectos cortos; es decir, cuando la distancia d es comparable con las alturas de las antenas h_T y h_R . Sin embargo, para trayectos grandes, es decir, cuando $d \gg h_T, h_R$, puede plantearse la siguiente hipótesis: (1) el ángulo reflejado, Ψ en la Fig. 2.4, es cercano a 0, (2) $\rho_{\perp\parallel}(\Psi \rightarrow 0) \approx -1$, y (3) $G_T(\theta_d, \varphi_d) \approx G_T(\theta_r, \varphi_r)$ y $G_R(\theta_d, \varphi_d) \approx G_R(\theta_r, \varphi_r)$. De esta manera la Ec. (2.26) se puede simplificar y reescribirse como

$$|E_T/E_D| \approx \left| 1 + e^{(-jk\Delta d)} \right|^2 = |2 \sin(\pi\Delta d/\lambda_c)|_{\Delta d \approx 2h_T h_R/d} \approx 4 \sin^2 \left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda_c d} \right). \quad (2.28)$$

El término $|E_T/E_D|$ derivado en la Ec. (2.28) se muestra en la Fig. 2.5(a), con respecto a la distancia de separación Tx/Rx, para alturas de antenas típicas en comunicaciones V2V ($h_T = h_R = 1,75$ m.) y $\rho_{\perp\parallel}(\Psi)$.

Por otra parte, para distancias pequeñas entre el transmisor y receptor, la influencia de la interferencia entre el trayecto directo y el reflejado es visible, y $|E_T/E_D|$ sufre un desvanecimiento espaciado hasta la distancia crítica, dada por $d_c = 4h_T h_R/\lambda_c$. Asimismo, cabe resaltar que el valor máximo (6 dB) del término $|E_T/E_D|$ ocurre para distancias donde la interferencia del trayecto reflejado es totalmente constructiva; mientras que también se puede ver cómo se obtiene un valor mínimo para distancias donde la interferencia es totalmente destructiva.

Cuando se considera el modelo de propagación a dos rayos, la fórmula de transmisión de Friis dada en la Ec. (2.16) se puede escribir como

$$P_R(d) = P_T + G_T(\theta_d, \varphi_d) + G_R(\theta_d, \varphi_d) - PL_{FS} + 10 \log_{10} |E_T/E_D|^2, \quad (2.29)$$

siendo el total de *path-loss* del modelo a dos rayos del enlace

$$P_R(d) \triangleq 10 \log_{10} (4\pi d/\lambda_c)^2 - 10 \log_{10} |E_T/E_D|^2, \quad (2.30)$$

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

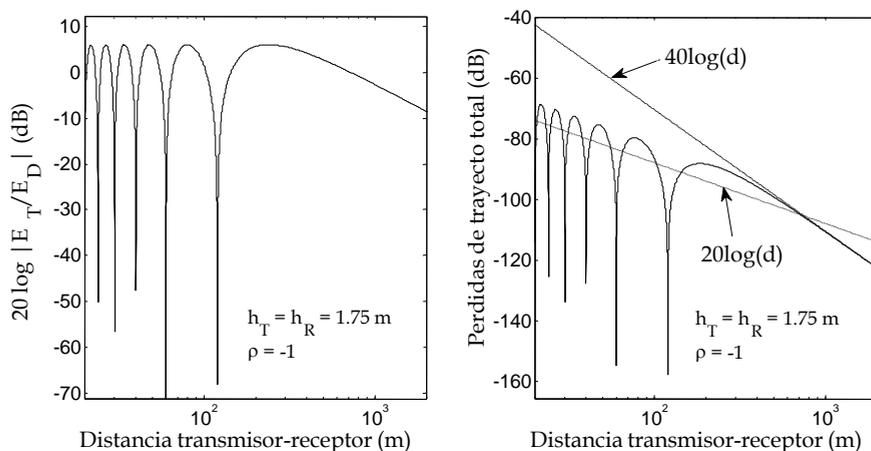


Figura 2.5: Modelo de propagación a dos rayos: (a) interferencia entre el trayecto directo y el reflejado, y (b) *path-loss* total.

Igualmente, en la Fig. 2.5(b) se muestra el *path-loss* total en función de la distancia de separación Tx/Rx, donde se han considerado $h_T = h_R = 1,75$ m. y $\rho_{\perp}(\Psi) = -1$.

El modelo de propagación a dos rayos puede utilizarse en entornos de carreteras y rurales como se ilustra con algunos resultados obtenidos en [24]. Además, dado que el trayecto directo puede ser afectado por lo que rodea el entorno, los autores (Kunisch y Pamp) sugieren un valor medio de *path-loss*, simbolizado aquí por $\overline{PL}_{Two-ray}(d)$, de la siguiente manera

$$\overline{PL}_{Two-ray}(d) = PL_0 + 10\gamma \log_{10} d - 10 \log_{10} |E_T/E_D|, \quad (2.31)$$

donde γ es el exponente de *path-loss* (diferente de 2, condición LOS), y PL_0 es una constante. Estos valores se pueden obtener a partir de los datos medidos usando técnicas de regresión lineal.

Cuando $\Delta d \ll \lambda_c$, la Ec. (2.28) se puede simplificar y reescribirse como

$$|E_T/E_D| \approx \frac{4\pi h_T h_R}{\lambda_c d}. \quad (2.32)$$

Luego el valor medio de *path-loss* total viene dado por

$$L(d) \approx 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda_c} \right)^2 - 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi h_T h_R}{\lambda_c d} \right)^2 = 10 \log_{10} \left(\frac{d^2}{h_T h_R} \right)^2, \quad (2.33)$$

2.3 Caracterización de canales V2X de banda estrecha

con lo cual, se tiene como resultado la conocida ley de potencia d^4 , es decir, que el *path-loss* total es proporcional a la cuarta potencia de la distancia de separación Tx/Rx.

Algunos autores han utilizado trazado de rayos basados en simulaciones [36] para estimar las pérdidas de propagación en escenarios urbanos. Asimismo en [18] los autores corroboran el comportamiento del modelo a dos rayos con medidas y simulaciones bajo condiciones LOS.

Modelo de la Universidad de Kangaku En [18], [37], los autores proponen unas fórmulas de predicción para estimar el valor medio de *path-loss* en entornos urbanos bajo condiciones LOS y NLOS basadas en medidas de canal. El valor medio de *path-loss* bajo condiciones LOS se estima de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} \overline{PL}_{\text{LOS}} = & \left[10,4 + 1,3 \log_{10} \left(\frac{h_T h_R}{\lambda_c} \right) \right] \log_{10} d + 24,6 \log_{10} \left(1 + \frac{d}{d_c} \right) + 19,4 \log_{10}(f_c) \\ & + 3,9 \log_{10}(W_s) + 33 \end{aligned} \quad (2.34)$$

donde f_c es la frecuencia de portadora; d_c es la distancia crítica, estimada por $d_c \approx 8h_T h_R / \lambda_c$; y W_s es el ancho de la calle. La geometría para el modelo de *path-loss* para condiciones LOS se muestra en la Fig.2.6

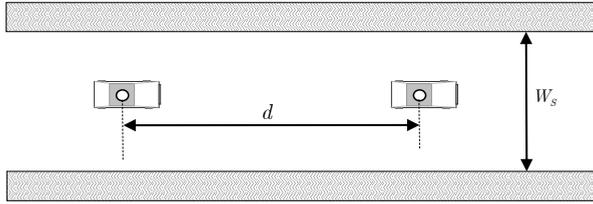


Figura 2.6: Geometría del modelo de *path-loss* de la Universidad de Kangaku para condiciones LOS.

En la Tabla 2.3 se resume el rango de validez de la Ec. (2.34).

Por otra parte, para condiciones NLOS, el modelo considera la geometría y parámetros ilustrados en la Fig.2.7. En este caso el valor medio de *path-loss* se estima como sigue

$$\overline{PL}_{\text{NLOS}} = \begin{cases} \overline{PL}_{\text{LOS}} & D \leq d_{EL} \\ \min(\overline{PL}_{\text{NLOS-1}}, \overline{PL}_{\text{NLOS-2}}) & D > d_{EL} \end{cases} \quad (2.35)$$

siendo

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

Parámetro	Entorno urbano
d (m)	2-1000
f_c (GHz)	0,4-6
W_s (m)	8,20,40,60
h_T, h_R (m)	0,5-3,5

Tabla 2.3: Rango de aplicación del modelo LOS de la universidad de Kangaku.

$$D = d_1 + W_{s1} + W_{s2} + d_2, \quad (2.36)$$

$$d_{EL} = d_1 + W_{s1} + W_{s2} + \left(\frac{W_{s1}W_{s2}}{d_1}\right), \quad (2.37)$$

y

$$\begin{aligned} \overline{PL}_{NLOS-1} = \{ & (3,2 - 0,033W_1 - 0,022W_2)d_1 + 39,4 \} \{ \log_{10}(D) - \log_{10}(d_{EL}) \} \\ & + L_{LOS}(d_{EL}) \end{aligned}, \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} \overline{PL}_{NLOS-2} = \left\{ -6,7 + 11,2 \log_{10} \left(\frac{h_T h_R}{\lambda_c} \right) \right\} \log_{10}(D) + \left\{ 25,9 + 10,1 \log_{10} \left(\frac{d_1}{\lambda_c} \right) \right\} \\ \log_{10} \left(1 + \frac{D}{d_c} \right) + 19,8 \log_{10}(f_c) - 3,8 \log_{10}(W_1 W_2) + 57,7 \end{aligned}, \quad (2.39)$$

donde la distancia crítica viene dada por $d_c = 4h_T h_R / \lambda_c$.

Una nueva modificación que mejora estas formulas de predicción del *path-loss* para condiciones LOS y NLOS se ha propuesto en [37], donde los valores medios de *path-loss* dados por las Ecs. (2.34) y (2.39) se sustituyen por las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} \overline{PL}_{LOS} = \left[7,2 + 7,1 \log_{10} \left(\frac{h_T h_R}{\lambda_c} \right) \right] \log_{10}(D') + 28,3 \log_{10} \left(1 + \frac{D'}{d_c} \right) - 1,2 \log_{10}(f_c) \\ - 19,6 \log_{10}(W_s) + 65,9 \end{aligned}, \quad (2.40)$$

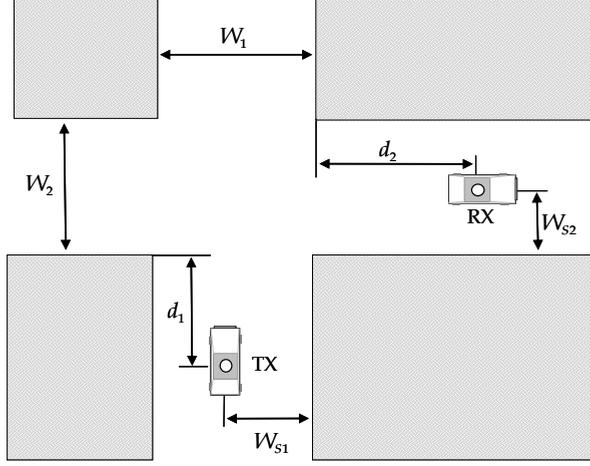


Figura 2.7: Geometría del modelo de *path-loss* de la Universidad de Kangaku para condiciones NLOS.

$$\overline{PL}_{NLOS-2} = \left\{ 47,6 + 6,6 \log_{10} \left(\frac{h_T h_R}{\lambda_c} \right) \right\} \log_{10}(D') + \left\{ 89,1 - 33 \log_{10} \left(\frac{d_1}{\lambda_c} \right) \right\} \log_{10} \left(1 + \frac{D'}{d_c} \right) + 19,9 \log_{10}(f_c) - 11,3 \log_{10}(W_1 W_2) + 2,8 \quad (2.41)$$

con $D' = d_1 + d_2$. Cabe resaltar que las Ecs. (2.40) y (2.41) han sido ajustadas a partir de resultados experimentales bajo condiciones de tráfico real.

2.3.2. Espectro Doppler

La variabilidad del canal en el tiempo y el efecto de propagación multitrayecto causan una dispersión en frecuencia o ensanchamiento Doppler. Además el movimiento de los terminales Tx y Rx, así como también el de los objetos que interactúan como otros vehículos entre los terminales, provocan que el ensanchamiento Doppler en los sistemas V2V sea diferente al de los sistemas F2M.

Los simuladores de canal necesitan crear modelos de canal, cuyas funciones de autocorrelación o espectro Doppler satisfagan los resultados teóricos. En este sentido, a continuación se describen el modelo teórico, algunos de los métodos de simulación de suma de sinusoides (SoS, *Sum-of-Sinusoids*) y algunos modelos

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

geométricos, con el propósito de mostrar cuales son las tendencias utilizadas por los investigadores, a la hora de estudiar y analizar como caracterizar el canal V2V con desvanecimiento bajo condiciones de dispersión isotrópica y no isotrópica. También, se ilustran las diferencias del comportamiento del espectro Doppler entre sistemas de comunicaciones V2X, presentando algunos resultados experimentales de acuerdo con la literatura disponible.

2.3.2.1. Modelos con dispersión isotrópica

Modelo de referencia Los modelos estocásticos de banda estrecha se centran en las características del espectro Doppler, como la clave para distinguir entre canales V2V y F2M. Los primeros esfuerzos para modelar el espectro de potencia de canales V2V de banda estrecha tuvieron su origen en [38], donde los autores proponen un modelo de referencia, en el cual asumen condiciones de desvanecimiento plano en frecuencia. Esta primera aproximación teórica del espectro Doppler en canales V2V se basa principalmente en dos importantes hipótesis: 1) el ángulo de salida (AOD, *Angle-Of-Departure*) y el ángulo de llegada (AOA, *Angle-Of-Arrival*) de las MPCs, se encuentran uniformemente distribuidos entre 0 y 2π , simbolizado por $U[0, 2\pi)$, y 2) la CIR tiene un perfil de potencia uniforme. Estas hipótesis suponen a su vez una dispersión isotrópica. Así, la función de autocorrelación de las componentes en fase y en cuadratura de la señal recibida, vienen dadas por

$$R_{gg}(\tau) = J_0(2\pi a \nu_R \tau) J_0(2\pi \nu_R \tau), \quad (2.42)$$

donde $J_0(\cdot)$ es la función de Bessel de orden cero de primera especie; $a = \nu_T / \nu_R$, con $\nu_R \geq \nu_T$, siendo $\nu_T = v_T / \lambda_c$ y $\nu_R = v_R / \lambda_c$ las frecuencias Doppler máximas del Tx y Rx, respectivamente, con v_T y v_R como las velocidades del Tx y Rx, respectivamente; y λ_c la longitud de onda. La función de autocorrelación para diferentes valores de a se muestra en la Fig. 2.8.

Es importante resaltar que $a = 0$ corresponde a canales V2I donde la Ec. (2.42) puede simplificarse como $R_{gg}(\tau) = J_0(2\pi \nu_R \tau)$. Por otra parte, la DPDS, $P_H(\nu)$, de la señal recibida es calculada tomando la transformada de Fourier de la función de autocorrelación dada en la Ec. (2.42), la cual puede ser expresada como [39]

$$P_H(\nu) = \begin{cases} AK \left[\frac{(1+a)}{2\sqrt{a}} \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{(1+a)\nu_R} \right)^2} \right] & -(\nu_T + \nu_R) < \nu < (\nu_T + \nu_R) \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}, \quad (2.43)$$

2.3 Caracterización de canales V2X de banda estrecha

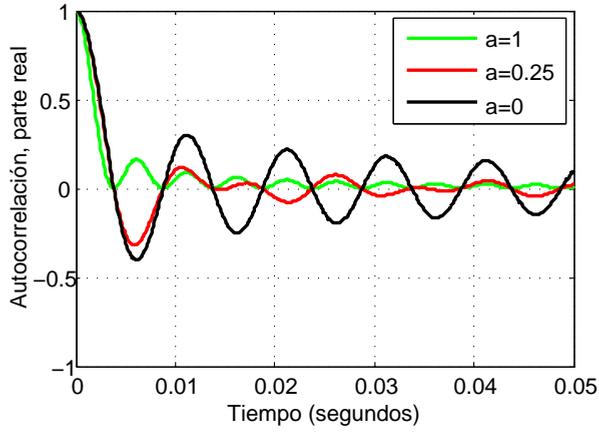


Figura 2.8: Función de autocorrelación del modelo de doble anillo para varios valores de a .

donde $A = \frac{1}{\pi^2 \nu_R \sqrt{a}}$ y $K[\cdot]$ es la integral elíptica completa de primera especie [40]. En la Fig. 2.9, se muestra el comportamiento de la DPDS como una función de la frecuencia, para diferentes valores de a .

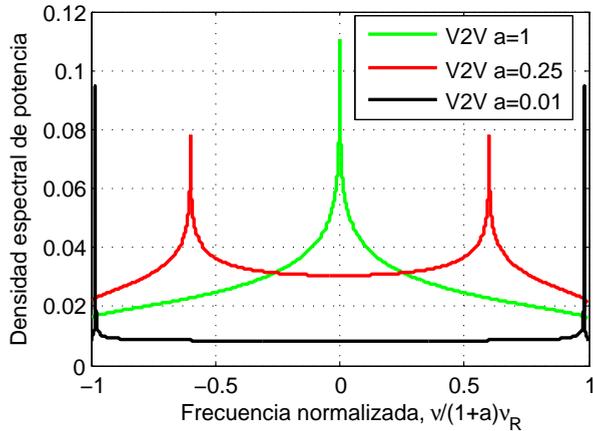


Figura 2.9: Densidad espectral de potencia Doppler para canales V2V isotópicos.

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

Cuando $a = 0$ la frecuencia Doppler máxima del Tx es nula y consecuentemente el Tx no se desplaza; lo cual corresponde a un canal V2I, donde la Ec. (2.43) puede ser simplificada y reescribirse como sigue

$$P_H(\nu) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\nu_R\sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_R}\right)^2}} & -\nu_R < \nu < \nu_R \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}, \quad (2.44)$$

la cual es, la DPSD clásica de Jakes [41], [42]. El valor cuadrático medio del ensanchamiento Doppler puede ser calculado de la Ec. (2.43) como

$$\nu_{rms} = \frac{1}{\lambda\sqrt{2}}v_{eff} = \frac{1}{\lambda}\sqrt{\frac{v_T^2 + v_R^2}{2}}, \quad (2.45)$$

donde $v_{eff} \triangleq \sqrt{v_T^2 + v_R^2}$ se define como la velocidad efectiva [21]. Se puede afirmar que la diferencia entre un canal V2V y un canal V2I es que el total de la frecuencia Doppler en el canal V2V es la composición de las frecuencias Doppler inducidas por el movimiento del Tx y Rx.

Modelo SoS para desvanecimiento Rician En [43] los autores proponen un método de suma de sinusoides (*sum-of-sinusoids*, SoS) para la simulación y caracterización de canales V2V con desvanecimiento tipo Rice. Este método fue originalmente sugerido en [44], basado en el modelo de dispersión de doble anillo con componente LOS. La Fig. 2.10 ilustra la geometría de este modelo, en el cual dispersores ubicados alrededor del Tx y Rx forman los dos anillos. Este modelo describe un entorno dispersivo para sistema de comunicaciones V2V con desvanecimiento Rice, donde el Tx y Rx están en movimiento.

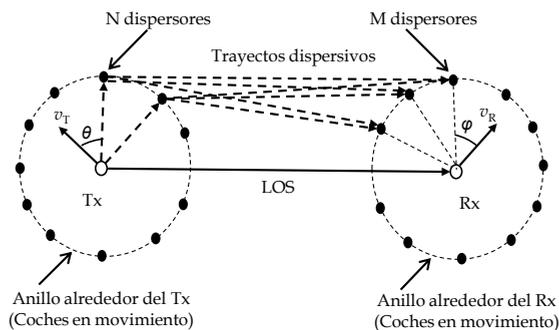


Figura 2.10: Entorno dispersivo para sistemas V2V con desvanecimiento tipo Rice.

2.3 Caracterización de canales V2X de banda estrecha

En la Fig. 2.10 θ y φ son el AOD y el AOA, respectivamente, en cada uno de los trayectos dispersivos, los cuales se encuentran uniformemente distribuidos, $U[-\pi, \pi)$ sobre los anillos, y son mutuamente independientes.

La envolvente compleja de la señal recibida de un canal V2V con desvanecimiento Rice simbolizada aquí como $r(t)_{Ri}$ viene dada por

$$r(t)_{Ri} = \frac{r(t)_{Ra} + \sqrt{K} e^{j2\pi\nu_3 t \cos \theta_{Re} + \phi_0}}{\sqrt{1+K}}, \quad (2.46)$$

donde $r(t)_{Ra}$ viene dada en la Ec. (2.48); $\sqrt{K} e^{j2\pi\nu_3 t \cos \theta_3 + \phi_0}$ es la componente LOS para canales V2I; ν_3 es la frecuencia Doppler causada por la velocidad relativa v_{Re} entre el Tx y Rx, si la velocidad del Rx se establece a cero; y θ_{Re} es el ángulo entre v_{Re} y la componente LOS. Estos parámetros se han definido en [43], de acuerdo al concepto de velocidad relativa. La fase inicial ϕ_0 es $U[-\pi, \pi)$. Por tanto la función de autocorrelación de $r(t)_{Ri}$ viene dada por

$$R_{ggRi}(\tau) = \frac{J_0(2\pi\nu_T\tau)J_0(2\pi\nu_R\tau) + K e^{j2\pi\nu_3\tau \cos \theta_{Re}}}{1+K}. \quad (2.47)$$

Modelo SoS para desvanecimiento Rayleigh En [44], los autores proponen un modelo estadístico SoS para canales con desvanecimiento Rayleigh, el cual considera las mismas condiciones que el modelo de desvanecimiento Rice, en este caso no se considera la componente LOS. Consecuentemente, la envolvente compleja de la señal recibida simbolizada aquí como $r(t)_{Ra}$ se puede expresar como

$$r(t)_{Ra} = A \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M e^{j2\pi t(\nu_T \cos \alpha_n + \nu_R \cos \beta_m) + j\Phi_{nm}}, \quad (2.48)$$

donde, N y M son el número de dispersores localizados alrededor de los anillos Tx/Rx, respectivamente, de acuerdo a la Fig. 2.10, siendo $A = \sqrt{\frac{1}{NM}}$, $\Phi_{n,m}$ las fases aleatorias independientes $U[-\pi, \pi)$, y α_n , y β_m vienen dadas por

$$\alpha_n = \frac{2\pi n - \pi + \theta}{4N}, \quad (2.49)$$

donde

$$\beta_m = \frac{2\pi m - \pi + \varphi}{2M}. \quad (2.50)$$

La función de autocorrelación de la Ec. (2.48) viene dada por

$$R_{ggRa}(\tau) = \frac{J_0(2\pi\nu_T\tau)J_0(2\pi\nu_R\tau)}{2}. \quad (2.51)$$

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

2.3.2.2. Modelos con dispersión no isotrópica

Modelos estadísticos Diferentes funciones de densidad de probabilidad (*pdfs*, *probability density functions*) no uniformes para el AOA del Rx móvil se han analizado en el caso de sistemas celulares. Se han propuesto algunos modelos para las *pdfs*, tales como: coseno [45], Gaussiana [46], von Mises [47], Laplaciana [48] y cuadrática [49]. De manera muy similar, en la mayoría de escenarios V2V reales se experimenta una dispersión no isotrópica, es decir, una distribución no uniforme del AOD y del AOA, para el Tx y Rx, respectivamente. Consecuentemente, en [50] el autor desarrolla un modelo estadístico para la dispersión no isotrópica en canales V2V con desvanecimiento Rayleigh, el cual toma en cuenta la *pdf* de von Mises, denotada aquí como $P(\alpha)$ sobre el rango $\alpha \in [0, 2\pi)$, para el AOD y el AOA. Esta *pdf* von Mises se expresa por

$$P(\alpha) = \frac{e^{k \cos(\alpha - \mu)}}{2\pi I_0(k)}, k \geq 0, \quad (2.52)$$

donde μ es la dirección media del AOD o del AOA, $I_0(\cdot)$ es la función de Bessel modificada de orden cero de primer tipo y k es el parámetro de concentración, el cual controla el ancho del dispersor. En la Fig. 2.11 se ilustra la *pdf* para $\mu = 0$ y diferentes valores de k .

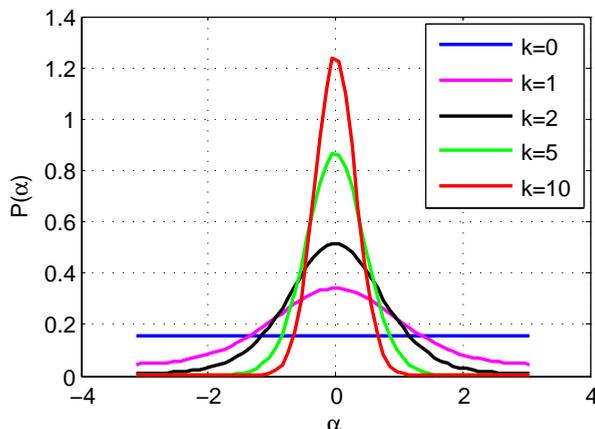


Figura 2.11: Función de densidad de probabilidad Von Mises.

La función de autocorrelación para canales V2V con desvanecimiento Rayleigh bajo condiciones no isotrópicas, que toma en cuenta la *pdf* von Mises para el AOD y el AOA, denotada aquí como $R_{ggRa}(\tau)$ viene dada en [50] de la siguiente manera,

2.3 Caracterización de canales V2X de banda estrecha

$$R_{ggRa}(\tau) = \prod_{i=1}^2 \frac{I_0 \left(\sqrt{k_i^2 - 4\pi^2 \nu_i^2 \tau^2 + j4\pi k_i \nu_i \tau \cos \mu_i} \right)}{I_0(k_i)}, \quad (2.53)$$

donde \prod denota el operador de multiplicación. La parte real de esta función de autocorrelación se ilustra en la Fig. 2.12.

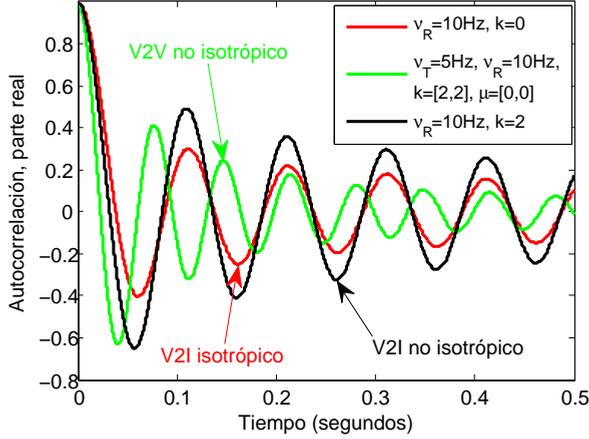


Figura 2.12: Parte real de $R_{ggRa}(\tau)$.

La Fig. 2.12 muestra cómo la autocorrelación de canales V2V puede ser comparable con la de canales V2I con un decaimiento con un decaimiento lento de la parte real. Asimismo, el canal V2V de-correla más rápido que el canal V2I debido a que en los canales V2V se experimenta un mayor desplazamiento Doppler total. Además, en [50] el autor muestra como la parte imaginaria de la función de autocorrelación toma valores cercanos a cero para el caso de canales V2I con dispersión isotrópica, tal como lo han comprobado otros autores.

En la Fig. 2.13 se muestra el DPDS de $R_{ggRa}(\tau)$ dado en la Ec. (2.53). Este $P_H(\nu)$ es diferente del dado en la Ec. (2.43). Sin embargo, para canales con dispersión no isotrópica, es decir, distribución no uniforme de AOD y AOA, no se ha podido obtener una expresión general del $P_H(\nu)$.

La Fig. 2.13 ilustra como el canal V2V con dispersión no isotrópica presenta desplazamientos Doppler en un solo lado, mientras que los canales V2I con dispersión isotrópica y no isotrópica presentan siempre un espectro Doppler simétrico.

Asimismo en [50] se desarrolla un modelo de simulación para generar la CIR con dispersión no isotrópica, el cual viene dado por

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

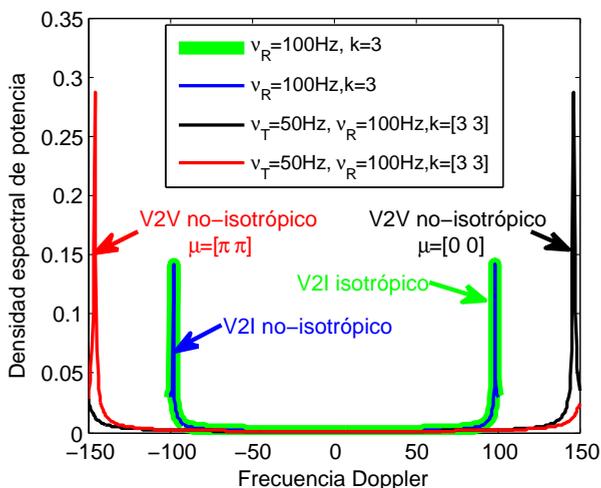


Figura 2.13: Densidad espectral de potencia Doppler para canales V2V no-isotrópicos.

$$g(t) = \sum_{n=1}^M B_n(t) \cos \theta + j \sum_{n=1}^M B_n(t) \sin \theta, \quad (2.54)$$

donde

$$\theta = 2\pi(C_{1,n} + C_{2,n})t + \phi_n, \quad (2.55)$$

siendo

$$C_{i,n} = \nu_i \cos \mu_i \cos \beta_{i,n}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (2.56)$$

$$S_{i,n} = \nu_i \sin \mu_i \sin \beta_{i,n}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (2.57)$$

$$B_n(t) = \sqrt{\frac{2}{M}} \cos[2\pi(S_{1,n} + S_{2,n})t + \phi'_n], \quad (2.58)$$

con $I = 1$ para el caso de sistemas V2I e $I = 2$ para el caso de sistemas V2V. Igualmente, las variables aleatorias son independientes para todo n con las siguientes distribuciones.

$$\begin{aligned} \beta_{1,n} &\sim M(0, k_1), & \beta_{2,n} &\sim M(0, k_2), \\ \phi_n &\sim U[-\pi, \pi), & \phi'_n &\sim U[-\pi, \pi) \end{aligned} \quad (2.59)$$

2.3 Caracterización de canales V2X de banda estrecha

donde $M(\cdot)$ denota la *pdf* von Mises.

Modelos geométricos Algunos autores han estudiado el comportamiento del espectro Doppler para canales vehiculares con dispersión no isotrópica en función de la geometría del entorno. En este sentido, en [51] se modela un entorno de carretera con el objeto de obtener un comportamiento aproximado del DPDS para canales vehiculares bajo condiciones de dispersión no isotrópica. La Fig. 2.14(a) muestra la geometría utilizada por los autores, para desarrollar las ecuaciones del modelo propuesto, en la cual los dispersores se encuentran localizados a lo largo de cada lado de la carretera.

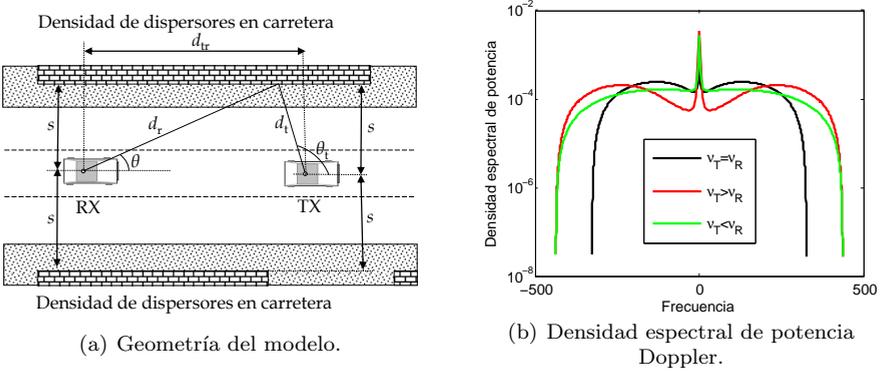


Figura 2.14: Ilustración de la geometría del modelo y su correspondiente densidad espectral de potencia Doppler.

En la Fig. 2.14(a) s es la distancia entre los vehículos de interés y la fila de objetos dispersores; d_{tr} es la distancia de separación Tx/Rx; θ es el ángulo entre los dispersores y el Rx; y θ_t es el ángulo entre los dispersores y el Tx. En este caso los autores definen el espectro de potencia en términos de θ como

$$|P_H(\nu(\theta))| = \frac{2P_t \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 d_0^4} G_r(\theta) G_t(\theta_t) D(d_t) D(d_r) \frac{s \rho \csc^2 \theta}{|d\nu/d\theta|}, \quad (2.60)$$

donde

$$d\nu/d\theta = -\frac{d\theta_t}{d\theta} (v_T \sin \theta_t / \lambda + v_R \sin \theta / \lambda), \quad (2.61)$$

y

$$\frac{d\theta_t}{d\theta} = \frac{s^2 \csc^2 \theta}{[(s \cot \theta - d_{tr})^2 + s^2]}, \quad (2.62)$$

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

donde ρ es la densidad de los dispersores sobre la carretera; d_0 es la distancia de referencia para la geometría; σ es la sección transversal radar (RCS, *Radar Cross Section*) del objeto dispersor; y P_t es la potencia transmitida. Por geometría $\theta_t = \tan^{-1}(s/s \cot \theta - d_{tr})$, $d_r = s \csc \theta$, $d_t^2 = s^2 + (s \cot \theta - d_{tr})^2$, $\nu = v_T \cos \theta_t / \lambda + v_R \cos \theta / \lambda$, siendo v_T y v_R las velocidades de los vehículos Tx y Rx respectivamente. $G_r(\theta)$ y $G_t(\theta_t)$ son las ganancias de las antenas receptora y transmisora respectivamente. Asimismo, $D(d)$ es una función de distancia definida como

$$D(d) = \begin{cases} \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 & \text{if } d \leq d_c \\ \left(\frac{d_0}{d_c}\right)^2 \left(\frac{d_c}{d}\right)^4 & \text{if } d > d_c \end{cases}, \quad (2.63)$$

donde d_c es la distancia crítica¹. Asimismo, en la Fig. 2.14(b) se muestra el comportamiento del espectro de potencia dado por la Ec. (2.60), para diferentes valores de v_T y v_R .

En este espectro de potencia, se ha añadido una *Lorentzian line-shape function*, $L(\nu)$ para representar la componente LOS, la cual puede ser expresada como

$$L(\nu) = \frac{P_r}{1 + A \left(\frac{\nu}{\nu_{dmax}}\right)}, \quad (2.64)$$

donde A es una constante para definir la potencia relativa dada la frecuencia Doppler máxima ν_{dmax} , y P_r es la potencia recibida.

Por otra parte, en la Fig. 2.15(a) se ilustra el modelo geométrico para un escenario V2V específico, centro urbano (*urban canyon*), donde se encuentran una densidad de dispersores situados a lo largo de la carretera.

Su correspondiente DPDS se ha estimado en [52] y viene expresada por

$$P_H(\zeta) = k \left\{ \left[\frac{d_2}{\sqrt{1-\zeta^2}} + \sqrt{\left(d_0 - \frac{d_2}{\zeta} \sqrt{1-\zeta^2}\right)^2 + d_1^2} \right]^{-\gamma} + \left[\frac{d_2'}{\sqrt{1-\zeta^2}} + \sqrt{\left(d_0 - \frac{d_2'}{\zeta} \sqrt{1-\zeta^2}\right)^2 + d_1'^2} \right]^{-\gamma} \right\}, \quad (2.65)$$

donde $0 < |\zeta| < 1$, con $\zeta = \frac{\nu}{\nu_{dmax}}$, $\nu_{dmax} = \frac{v_d}{\lambda_c}$ es la frecuencia Doppler máxima, siendo v_d la velocidad relativa entre los vehículos, y d_0 es la distancia de

¹En la practica d_c es relacionada con las características del entorno de propagación y hay diferencias importantes entre urbanas, suburbanas, autopistas y áreas rurales.

2.3 Caracterización de canales V2X de banda estrecha

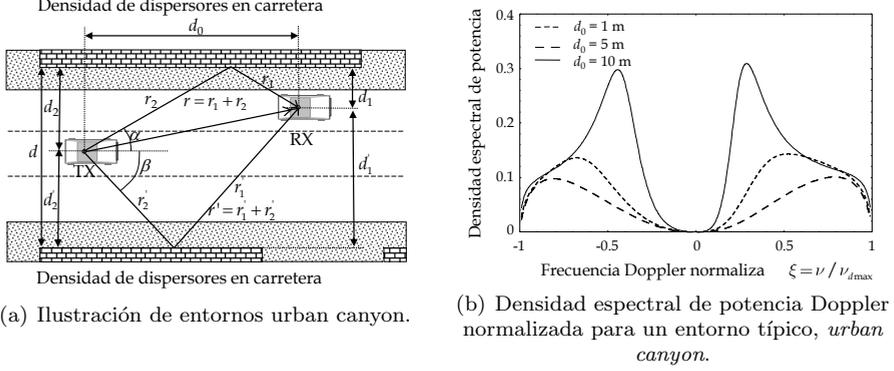


Figura 2.15: Modelo para centro urbano

separación Tx/Rx a lo largo de la carretera; d_1 y d_2 son la distancias ilustradas en la Fig. 2.15(a); r y r' vienen dadas por

$$r = r_1 + r_2 = \sqrt{\left(d_0 - \frac{d_2 \cos \alpha}{\sin \alpha}\right)^2 + d_1^2} + \frac{d_2}{\sin \alpha}, \quad (2.66)$$

$$r' = r'_1 + r'_2 = \sqrt{\left(d_0 - \frac{d'_2 \cos \beta}{\sin \beta}\right)^2 + d_1'^2} + \frac{d'_2}{|\sin \beta|}, \quad (2.67)$$

y

$$k = \frac{1}{A\nu_{dmax}\sqrt{1-\zeta^2}}, \quad (2.68)$$

con

$$A = \int_{-\pi}^0 \frac{1}{(r')^\gamma} d\alpha + \int_0^\pi \frac{1}{r^\gamma} d\beta. \quad (2.69)$$

En la Fig. 2.15(b) se ilustra el DPDS, dado en la Ec. (2.65) para un canal Doppler simétrico, (es decir, $d_1 = d'_1 = 5$ m., $d_2 = d'_2 = 3$ m.) y $\gamma = 3$ [52].

Para distancias a lo largo de la carretera, d_0 y con ordenes de magnitud similares para las distancias, d_1 , d_2 , d'_1 y d'_2 mostradas en la Fig. 2.15(a), las curvas se suavizan y la asíntota de la Fig. 2.15(b), no aparece. Por otra parte, para un canal con Doppler asimétrico, (es decir, $d_1 \neq d'_1$ y $d_2 \neq d'_2$), la asimetría del DPDS incrementa alrededor de la frecuencia Doppler central.

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

2.3.2.3. Resultados experimentales

El valor cuadrático medio del ensanchamiento Doppler derivado a partir de algunas campañas de medida [21], [53], puede aproximarse como una función de la velocidad efectiva v_{eff} , por

$$\nu_{rms} = \frac{s}{\lambda_c \sqrt{2}} v_{eff} + \delta, \quad (2.70)$$

donde $s/\lambda_c \sqrt{2}$ es la pendiente y δ es un *offset*. Es importante resaltar que cuando $s = 1$ y $\delta = 0$ se tiene el caso de dispersores isotrópicos, Ec. (2.45). En la Tabla 2.4 se resumen los valores de s y δ dados en [53], para diferentes entornos V2V.

Parámetro	Suburbano	Autopista	Rural
<i>Offset</i> , δ	11.2	0.2	0.5
pendiente, s	0.428	0.414	0.420

Tabla 2.4: Parámetros medidos para el ensanchamiento Doppler rms .

Se puede observar claramente como s es significativamente menor que 1, dada la orientación no isotrópica de los objetos dispersores en escenarios reales. Igualmente, el ensanchamiento Doppler normalmente se incrementa si la distancia de separación Tx/Rx aumenta. Obviamente, este ensanchado es el resultado de la tendencia del incremento de la velocidad del vehículo a mayores separaciones entre vehículos.

La Tabla 2.5 resume los resultados de los parámetros Doppler para entornos urbanos y autopistas, con distancias de separación Tx/Rx en el rango de 5 hasta 300 m., bajo condiciones de tráfico real. Dado que la velocidad relativa media entre los vehículos medidos es cero, es comprensible que el valor medio de la variación Doppler \bar{m}_D sea aproximadamente cero.

Parámetro	Urbano	Suburbano	Carretera	Rural
	33 [24]	-	92 [24]	108 [24]
$\bar{\nu}$ (Hz)	86 [19]	-	120 [19]	-
	263-341 [23]	-	761-978 [23]	782 [23]

Tabla 2.5: Parámetros medidos del espectro de potencia Doppler.

2.3.2.4. Tiempo de coherencia

El tiempo de coherencia T_c del desvanecimiento a pequeña escala es determinado por el valor cuadrático medio del ensanchamiento Doppler y depende del movimiento de los vehículos y dispersores. Asimismo, el valor cuadrático

2.3 Caracterización de canales V2X de banda estrecha

medio del ensanchamiento Doppler cuantifica la rapidez de variación del canal y cómo una sinusoidal pura se dispersa sobre una banda de frecuencia. El T_c del canal dado en [6], puede estimarse por

$$T_c \approx \frac{1}{2\pi\nu}, \quad (2.71)$$

La frecuencia Doppler máxima en un escenario V2V puede ser hasta cuatro veces mayor que la que se pueda encontrar en escenarios F2M con la misma velocidad. Esto es debido a los movimientos del Tx/Rx, así como también a algunos dispersores relevantes en el escenario V2V.

Observando la Ec. (2.70) y la Ec. (2.71), se puede ver cómo el T_c tiene una relación inversa con la v_{eff} . Asimismo, resultados aportados en [21] muestran como el T_c decrece cuando la distancia de separación Tx/Rx incrementa. Sin embargo, se precisa realizar un número mayor de campañas de medida en entornos V2V, que permitan comparar los resultados obtenidos y conceptualizar de mejor manera todos estos parámetros.

2.3.3. Estadísticas de desvanecimiento

En los canales variantes en el tiempo, la propagación multitrayecto provoca un desvanecimiento de la señal recibida, dada la diferencia de fase entre las diferentes MPCs. El desvanecimiento de la señal a pequeña escala, variable Y en la Ec. (2.18), puede modelarse por las distribuciones clásicas de Rayleigh y Rice. El desvanecimiento Rayleigh modela con gran fidelidad situaciones en las que el número de MPCs es elevado teniendo amplitudes similares. Invocando el teorema del límite central, la variación temporal de la envolvente de la señal recibida, representada por $r(t)$, en una pequeña área local alrededor del Rx, sigue una distribución Rayleigh, con función densidad de probabilidad (fdp) dada por

$$fdp_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{\left\{-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right\}}, \quad (2.72)$$

donde $E\{r^2\} = 2\sigma^2$ es el valor cuadrático medio de la distribución, equivalente a la potencia media de la señal recibida. El desvanecimiento Rayleigh generalmente ocurre en condiciones de no visión directa (NLOS, *Non-Line-Of-Sight*). En la Fig. 2.16 se ilustra el comportamiento de la fdp Rayleigh.

En condiciones de visión directa (LOS, *Line-Of-Sight*) en donde existe una componente dominante, con una potencia A^2 , la envolvente recibida muestra una distribución Rice, dada por

$$fdp_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{\left\{-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}\right\}} I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right), \quad (2.73)$$

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

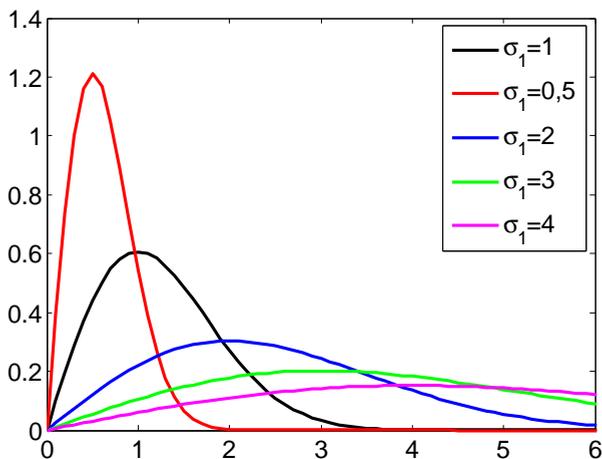


Figura 2.16: Función de densidad de probabilidad Rayleigh.

siendo $I_0(\cdot)$ la función de Bessel modificada de orden cero de primera especie [40]. El valor cuadrático medio de la distribución Rice es $E\{r^2\} = 2\sigma^2 + A^2$. Para modelar la severidad del desvanecimiento, se utiliza normalmente el llamado factor Rice, denotado por K , definido como la relación entre la potencia de la contribución dominante y la potencia asociada a las MPCs, dado por la siguiente expresión

$$K \triangleq \frac{A^2}{2\sigma^2}. \quad (2.74)$$

Cabe resaltar que cuando $K \rightarrow 0$, la distribución Rice tiende a la distribución Rayleigh. Por otra parte, puede destacarse que el desvanecimiento Rice aparece generalmente en condiciones LOS. En la Fig. 2.17 se ilustra el comportamiento de la fdp Rice.

Sin embargo, se pueden utilizar otras distribuciones para modelar el desvanecimiento a pequeña escala, basados en datos medidos, tales como las distribuciones Nakagami- m y Weibull. En el desvanecimiento Nakagami- m , la fdp de la envolvente de la señal recibida viene dada por

$$f d p_r(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega} r^2}, \quad (2.75)$$

donde $\Omega = E\{r^2\}$ y m es el llamado factor de forma (parámetro de desvanecimiento). Cuando $m = 1$, la distribución Nakagami- m tiende a la distribución Rayleigh, ($\Omega = 2\sigma^2$), y si $m \gg 1$, la distribución Nakagami- m puede aproximarse a la distribución Rice [54], en este caso ($\Omega = 2\sigma^2 + A^2$) con

2.3 Caracterización de canales V2X de banda estrecha

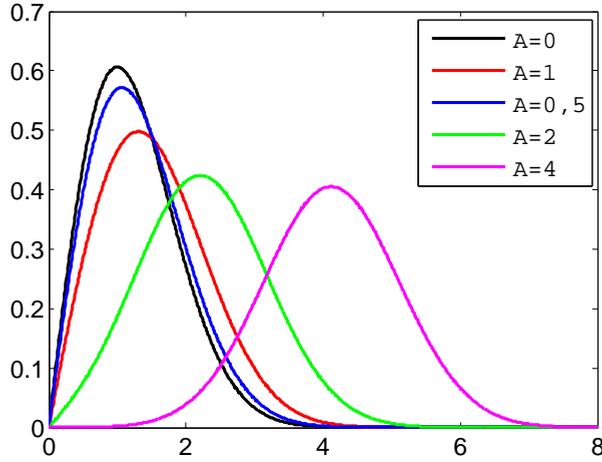


Figura 2.17: Función de densidad de probabilidad Rice.

$$m|_{m \gg 1} = \frac{(K + 1)^2}{(2K + 1)}. \quad (2.76)$$

En la Fig. 2.18 se ilustra el comportamiento de la fdp Nakagami- m .

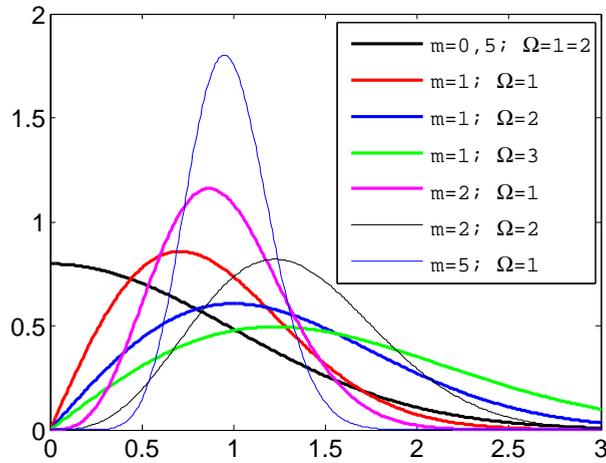


Figura 2.18: Función de densidad de probabilidad Nakagami- m .

En el desvanecimiento Weibull, la fdp de la envolvente de la señal recibida viene dada por

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO VEHICULAR

$$f dp_r(r) = \frac{\beta}{\Omega} r^{\beta-1} e^{\left\{-\frac{r^\beta}{\Omega}\right\}}, \quad (2.77)$$

donde $\beta > 0$ es el parámetro de desvanecimiento. Cuando $\beta = 2$, la distribución Weibull tiende a la distribución Rayleigh, y cuando $\beta \gg 2$, la distribución Weibull puede también aproximarse a la distribución Rice.

En entornos V2V los transmisores y receptores se pueden desplazar a grandes velocidades, lo que ocasiona que pueda tenerse diferentes estadísticas de desvanecimiento dependientes de la existencia de LOS. Algunos resultados obtenidos en entornos urbanos y carreteras aportados en [19], muestran que el desvanecimiento a pequeña escala puede aproximarse con gran fidelidad por las distribuciones Rice y Nakagami- m . Asimismo, en [21] se utilizan medidas de canales V2V a 5,9 GHz para caracterizar las estadísticas de variabilidad temporal. Los autores utilizan la distribución Nakagami- m para modelar la envolvente de la señal recibida e ilustran como el parámetro m es inversamente proporcional a la distancia de separación Tx/Rx debido a la disminución de la componente LOS a medida que aumenta la distancia, debido entre otros factores a los giros o intersecciones en escenarios de carreteras. Para distancias cortas, resultan muy frecuentes condiciones LOS debido a que no existen obstáculos que invadan el primer elipsoide de Fresnel entre los vehículos. Así en [21] se muestran las variaciones de m con la distancia para dos conjuntos de datos medidos. Igualmente, en [55] se ha utilizado regresión lineal para conseguir un mejor ajuste de la variación de m con la distancia dada por

$$m = -1,3 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + 3,7. \quad (2.78)$$

Por otra parte, resultados obtenidos en [19] muestran que el desvanecimiento a gran escala, producido por la obstrucción de las MPCs, puede aproximarse mediante la distribución log-normal. Sin embargo, se producen situaciones de bloqueo intermitente de las MPCs, que causan que la contribución del desvanecimiento a gran escala, variable X_σ en la Ec. (2.18), no siga una distribución Gaussiana. En este caso y basados en resultados empíricos en [21], los autores proponen modelar conjuntamente el desvanecimiento a pequeña y gran escala usando la distribución Nakagami- m .

Capítulo 3

Sistemas de medida y descripción de los escenarios de propagación

3.1. Introducción

Para llevar a cabo una caracterización de canales en escenarios vehiculares, es de vital importancia realizar campañas de medidas experimentales, que permitan la simulación, diseño, análisis y modelado de dichos canales. Para la realización de estas medidas, se pueden emplear sistemas tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo. Asimismo, a la hora de elegir la sonda de canal adecuada se deben tener en cuenta tanto las limitaciones que tienen los equipos de medida, dado que su funcionamiento en recepción es superheterodino, como el estar bajo condiciones de la suposición de canales WSSUS.

La limitación debida a la recepción mediante un desplazamiento del espectro de la señal de entrada a una frecuencia intermedia, se determina en los equipos de medida seleccionando los diferentes anchos de banda de los filtros de frecuencia intermedia, los cuales marcarán la resolución, el tiempo de medida y el nivel de ruido. Reducir el ancho de banda del filtro de frecuencia intermedia conlleva un mayor tiempo de adquisición de las medidas; sin embargo se mejora la relación señal a ruido y la resolución en frecuencia.

Por otra parte, para presentar condiciones de WSSUS, el canal debe permanecer estacionario durante un período de tiempo, y por tanto, el tiempo de medida t_m debe ser inferior al tiempo de coherencia t_c .

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

A partir de estas consideraciones y teniendo como objetivo medir los parámetros que caracterizan las pérdidas de propagación en canales vehiculares, resulta necesario estudiar el comportamiento en frecuencia, espectro Doppler y las estadísticas de desvanecimiento a pequeña y gran escala. En este sentido, en este proyecto, se han propuesto e implementado dos sistemas de medida en el dominio de la frecuencia, utilizando sondas de canal para medidas del canal a 5,9 GHz [56], (banda DSRC) y 700 MHz (en Japón, la desaparición de la televisión analógica en esta banda, ha hecho pensar que se pueda destinar para temas de seguridad vehicular), teniendo en cuenta los equipos con los que cuenta el grupo de radiación electromagnética (ERG, Electromagnetic Radiation Group) del ITEAM.

A continuación se hace una descripción de los equipos y parámetros utilizados para la conformación y configuración de los sistemas de medida, Asimismo, se describen los escenarios de propagación en los que se han realizado la campaña de medidas.

3.2. Sonda de canal

3.2.1. Sonda a 5,9 GHz

La sonda de canal implementada para la caracterización del canal en banda estrecha, se muestra en la Fig. 3.1. Esta sonda de canal, esta formada por el generador de señal HP83620A en el vehículo Tx, transmitiendo una portadora sin modular a 5,9 GHz y un analizador de redes vectorial (ARV) ZVA24 de Rohde & Schwarz en el vehículo Rx, el cual tiene un rango en frecuencia que oscila desde 10 MHz hasta 24 GHz, con el que se pueden medir los parámetros de dispersión o parámetros S entre sus puertos para un número de puntos en frecuencia. Cabe resaltar que el ARV se ha utilizado en modo medidor de potencia, midiendo directamente el parámetro b_2 .

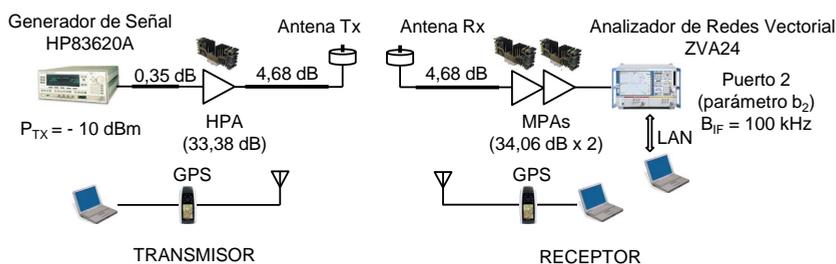


Figura 3.1: Sonda de canal a 5,9 GHz.

Las antenas utilizadas en Tx/Rx son monopolos magnéticos en $\lambda/4$ con una ganancia en el plano horizontal de aproximadamente $-2,56$ dB y un parámetro de *scattering* S_{11} inferior a -22 dB. En transmisión se ha utilizado un amplificador de potencia, permitiendo transmitir con una PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) igual a $23,8$ dBm. En recepción se han utilizado dos amplificadores en serie, con una ganancia total de $68,12$ dB. Los cables utilizados son de bajas pérdidas, aproximadamente $1,15$ dB/m., a $5,9$ GHz.

Los vehículos se han equipado con receptores GPS, controlados por ordenadores personales (PC) para disponer de información sobre el instante de la adquisición de las medidas, velocidad relativa y distancia de separación Tx-Rx.

Los vehículos utilizados en las medidas han sido un Renault Clio (Tx) Fig. 3.2(a) y un Peugeot 406 (Rx) Fig. 3.2(b). Las antenas se han montado sobre el techo de los vehículos a una altura aproximada de $1,41$ m. y $1,45$ m. sobre el suelo para el Tx y Rx, respectivamente. Asimismo, en la Fig. 3.2 se muestra parte del equipamiento de a bordo. En cada uno de los vehículos se han utilizado baterías de 75 Ah e inversores de 12 V-CC a 220 V-CA como sistema de alimentación, permitiendo un tiempo de autonomía próximo a 90 minutos.

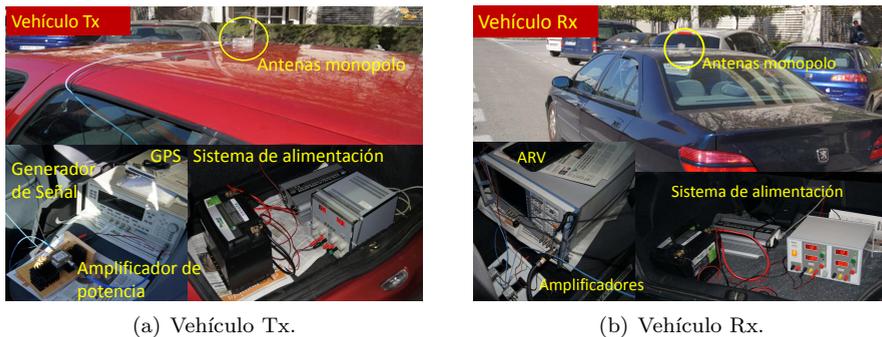


Figura 3.2: Vehículos Tx-Rx junto con el equipamiento de a bordo a $5,9$ GHz.

A continuación detallaremos en profundidad las características principales de todos y cada uno de los elementos del sistema.

3.2.1.1. Ordenadores personales

Se han utilizado dos ordenadores para conectar el receptor GPS al sistema, sincronizando y almacenado los datos de posición, velocidad y tiempo. Esto se realiza mediante los puertos USB de ambos ordenadores. Para este fin se utiliza el cable *USB to Serial Cable* de SITECOM, con conexión a su puerto serie (NMEA 0183) y conexión serie RS-232 al otro extremo para a continuación co-

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

nectarlo a un interfaz conversor de puerto RS-232 al USB. Para que la conexión se realice satisfactoriamente es necesario instalar el controlador del propio cable encargado de gestionar el conversor RS-232 a USB el cual permite velocidades de hasta 400 Mbps. Con todos los cables conectados se puede establecer una conexión entre el puerto serie del GPS y el puerto USB del ordenador.

Por otro lado, se ha utilizado otro ordenador que tiene como función la comunicación con el ARV ZVA-24 a través de una conexión de red de área local (LAN). Dicha comunicación se consigue con la utilización de un cable de red cruzado, provistos a sus extremos de conectores RJ45, que interconecta ambos elementos. Lo cual permite la comunicación *full duplex* entre ambos dispositivos. Adicionalmente, los ordenadores se han sincronizado en tiempo para poder relacionar las medidas adquiridas por el ARV y la información suministrada por los receptores GPS.

3.2.1.2. Analizador de redes vectorial

La utilización del analizador de redes Vectorial como medidor de potencia se debe a que dentro del equipamiento disponible en el laboratorio, es el único capaz de tomar datos a la frecuencia de 5,9 GHz con la suficiente velocidad de adquisición como para que los resultados cumplan los requisitos de estacionariedad. Cabe notar, que es muy posible que este dispositivo pueda ser utilizado para un posterior análisis del canal de comunicaciones vehiculares en banda ancha.

El método de medida utilizado con el ARV consiste en la adquisición de los niveles de potencia recibida por el analizador en una de sus entradas, concretamente el parámetro b_2 , tomando 5,9 GHz como frecuencia central y SPAN 0. O lo que es equivalente, activando el modo onda continua (CW) a la frecuencia de trabajo.

El nivel de ruido térmico del conjunto de elementos que forman el Rx (antena, cables, amplificadores y el propio ARV) es del orden de -80 y -70 dBm para valores de ancho de banda de frecuencia intermedia, B_{FI} , del ARV de 10 y 100 kHz, respectivamente. La resolución temporal (tiempo de adquisición de una medida) es del orden de $135 \mu\text{s}$ y $45 \mu\text{s}$ para valores de B_{FI} iguales a 10 y 100 kHz, respectivamente. En la práctica, la elección de B_{FI} responde a un compromiso entre margen dinámico en la medida y tiempo de adquisición. Así, valores bajos de B_{FI} permiten un mayor alcance Tx/Rx, mientras que valores altos permiten analizar con mayor resolución espacial el comportamiento de desvanecimiento a corto plazo al reducir el tiempo de adquisición de las medidas. En la Fig. 3.3 se ilustran los valores del margen dinámico del ARV para valores de B_{FI} de 10 y 100 kHz.

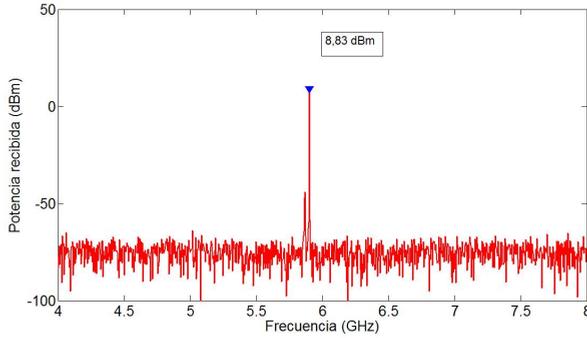
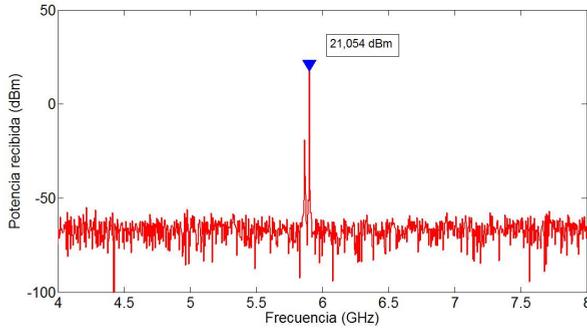
(a) Margen dinámico del ARV, $B_{FI}=10$ kHz.(b) Margen dinámico del ARV, $B_{FI}=100$ kHz.

Figura 3.3: Margen dinámico del ARV en función del ancho de banda de frecuencia intermedia B_{FI} .

3.2.1.3. Amplificadores

En la parte transmisora se utiliza un ZVE-3W-83+, el cual es un amplificador de potencia que trabaja en la banda de 2 a 8 GHz, de 3 W de potencia, ganancia máxima de 40 dB, potencia de salida a 1 dB de compresión típica de 33 dBm y una figura de ruido típica de 5,8 dB. Se alimenta con un voltaje de 15 V y 1,5 A de corriente. Asimismo, el sistema amplificador en recepción se ha implementado con dos amplificadores en cascada ZVE-8G+. Sus características más significativas son: un rango de frecuencias de operación entre 2 y 8 GHz, ganancia máxima de 30 dB, potencia de salida máxima con compresión de 1 dB de 30 dBm y figura de ruido típica de 4 dB. En cuanto a las exigencias de alimentación es necesario un voltaje de 12 V y 1,2 A de corriente. En las Figs. 3.4(a) y 3.4(b) se muestra el montaje realizado en el laboratorio

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

del amplificador de potencia utilizado en Tx y los dos amplificadores en serie utilizados en Rx, respectivamente. En ambos casos, los amplificadores están situados sobre soportes diseñados en el laboratorio para facilitar la conexión al instalar el sistema de medida.

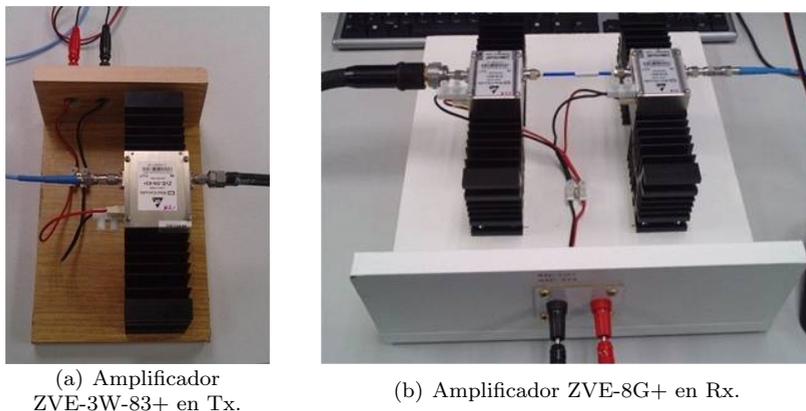


Figura 3.4: Amplificadores del sistema a 5,9 GHz.

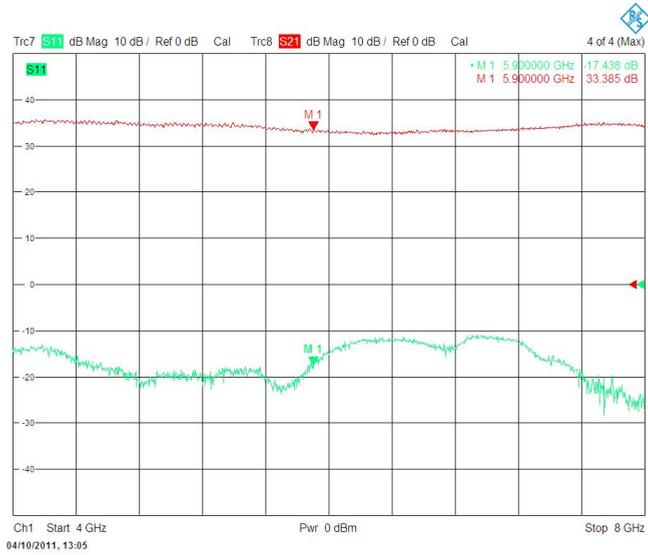
De igual manera en las Figs. 3.5(a) y 3.5(b) se muestran las curvas de los parámetros de dispersión S_{21} y S_{11} en un rango de 4 a 8 GHz para los amplificadores utilizados en Tx y Rx, respectivamente. Para 5,9 GHz se ilustra una ganancia típica de 33.4 dB para el amplificador en Tx y 34.1 dB en Rx.

3.2.1.4. Cables y conectores

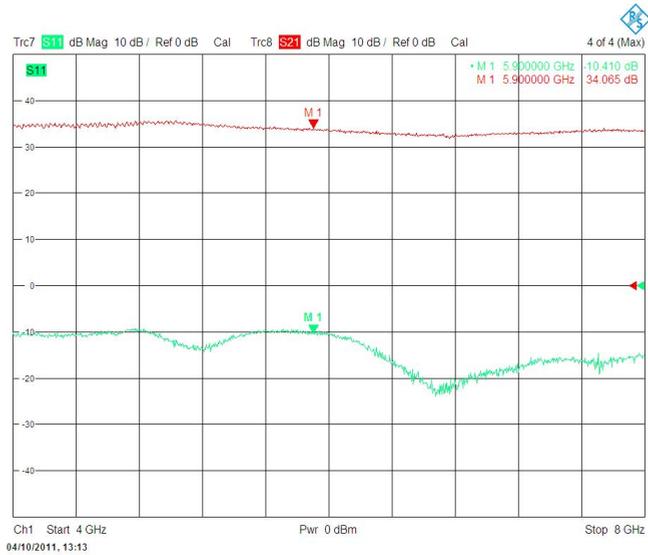
Se han utilizado cables de 50 cm de longitud de (Spectrum Elektrotechnik) serie 0140-0500-11-11 Lot 46/2005. De acuerdo a su hoja de parámetros de dispersión, presentan unas pérdidas de inserción de 0,3292 dB. Inicialmente, el propósito de estos cables es unir los amplificadores con el equipo de medida en recepción y con el generador de señales en transmisión, aunque solamente se ha utilizado en transmisión. De igual manera la conexión entre los amplificadores y las antenas se realiza utilizando cables TOTOKU TCF280, con una longitud de 4 m. Estos cables tienen una gran flexibilidad y funcionan en un amplio margen de frecuencias, hasta 50 GHz. Las técnicas de fabricación utilizadas permiten que presenten baja atenuación por metro, estabilidad de fase frente a la temperatura y doblado y unos parámetros de reflexión en el conector reducidos.

Una vez se han medido las características eléctricas de los cables utilizados para interconectar los amplificadores, se tomó como valor promedio de pérdidas introducidas en toda la extensión del cable 0,35 dB y para el caso de los cables

3.2 Sonda de canal



(a) Parámetro S_{21} del amplificador en Tx.



(b) Parámetro S_{21} del amplificador en Rx.

Figura 3.5: Parámetros de dispersión de los amplificadores a 5,9 GHz.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

utilizados para interconectar los amplificadores con las antenas, se tomaron unas pérdidas de 4,68 dB. En los dos casos se han realizado las medidas a 5,9 GHz.

3.2.1.5. Antenas

Las antenas utilizadas en Tx-Rx son monopolos magnéticos, diseñadas por el GRE, en $\lambda/4$ con una ganancia máxima de aproximadamente 5,44 dB y un parámetro de *scattering* S_{11} inferior a -21 dB a 5,9 GHz. La ganancia y el patrón de radiación han sido medidos en una cámara anecoica, montando la antena sobre un plano metálico de 1 m. por 1 m., emulando el techo de un vehículo. La Fig. 3.6 muestra una imagen de la antena y su correspondiente patrón de radiación en el plano de elevación. Con el propósito de lograr una cobertura omnidireccional, las antenas han sido montadas en el centro del techo del vehículo (ver Fig. 3.2), por medio de una base magnética con polarización vertical. La ganancia medida de las antenas en el plano horizontal fue de 2,56 dB.

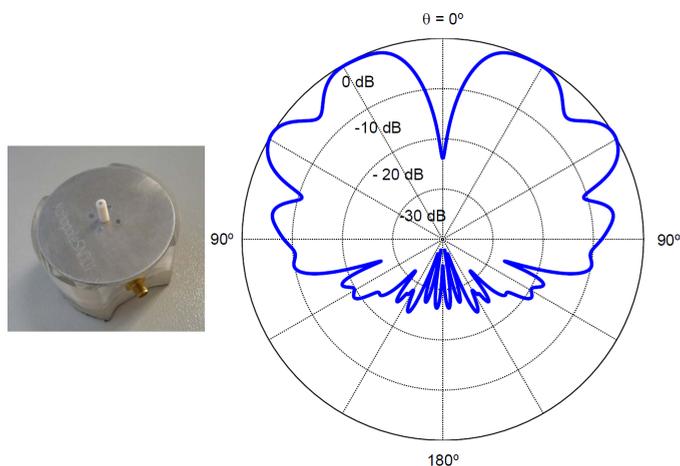


Figura 3.6: Antena monopolo utilizada en las medidas y su correspondiente patrón de radiación en el plano de elevación.

3.2.2. Sonda a 700 MHz

La sonda de canal que se ha implementado a 700 MHz se muestra en la Fig. 3.7. Esta sonda de canal esta formada por el generador de señal HP8648C en el vehiculo Tx, transmitiendo una portadora sin modular a 700 MHz y un analizador de espectros (AE) HP8590L de Hewlett Packard en el vehiculo Rx, el cual tiene un rango en frecuencia que oscila desde 9 kHz hasta 1,8 GHz, con el que se puede medir directamente el valor de potencia para 401 puntos en

frecuencia. En la recepción de la señal, la antena receptora interconecta la señal recibida con dos amplificadores de *Mini Circuits*, modelo ZFL-2500, conectados en cascada mediante un latiguillo de 50 cm, cuya salida se encuentra conectada con el analizador de espectros HP 8590L.

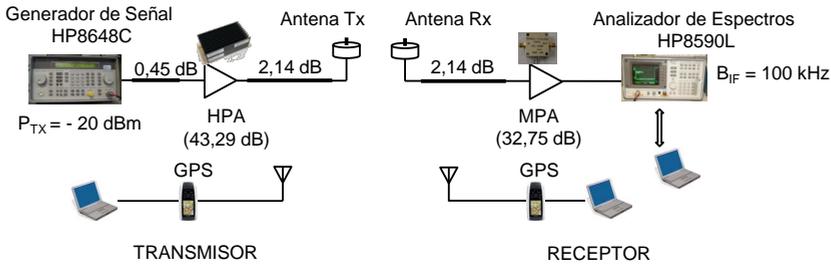


Figura 3.7: Sonda de canal a 700 MHz.

Como se ha comentado anteriormente se realizaron campañas de medida en paralelo, a 5,9 GHz y 700 MHz, con el objeto de llevar a cabo una caracterización del canal en banda estrecha y del mismo modo comparar el comportamiento de los parámetros que caracterizan el canal en las dos bandas de frecuencia. En la Fig. 3.8 se ilustra el montaje de los sistemas de medida a 5,9 GHz y 700 MHz con el equipamiento de a bordo.

Para determinar la información relativa a la posición relativa de los vehículos se ha utilizado el mismo sistema de GPS que en el caso de la sonda de canal a 5,9 GHz. También, se dispone de un ordenador que se encarga de la comunicación con el analizador de espectros HP 8590L a través del puerto serie y de un conversor de USB al interfaz HP-IB (Hewlett-Packard Interface Bus) que se conecta al puerto HP-IB del analizador. Para configurara adecuadamente los equipos en esta comunicación es necesario instalar en el PC-AE las librerías de entrada y salida del fabricante, disponibles en la página web de Agilent.

3.2.2.1. Analizador de espectros

Como se ha comentado anteriormente, el equipo utilizado es el analizador de espectros (AE) HP8590L de Hewlett Packard. Este equipo es capaz de medir potencia y tensión rms, potencia de ruido, intensidad de campo, etc; además, puede actuar como generador de señales. Se ha escogido este equipo para la adquisición del nivel de potencia recibida debido a sus características técnicas, las cuales permiten que los tiempos de adquisición de las medidas se encuentren dentro de los tiempos de coherencia y rango de frecuencias requeridos para el análisis de banda estrecha a 700 MHz.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

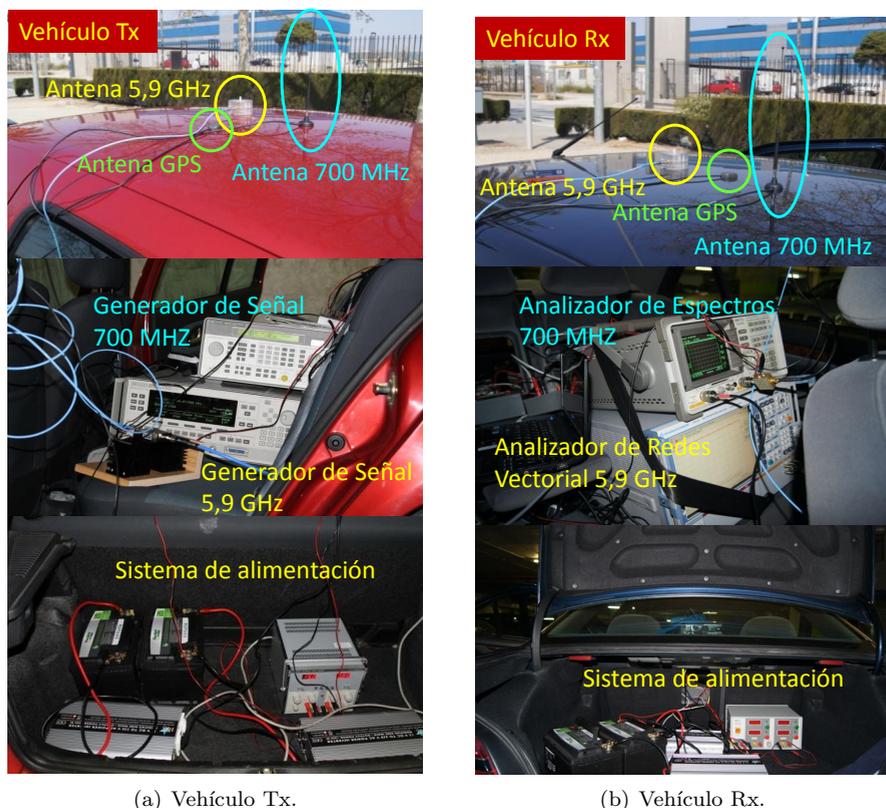


Figura 3.8: Vehículos Tx/Rx junto con el equipamiento de a bordo a 5,9 GHz y 700 MHz.

3.2.2.2. Antenas

Las antenas utilizadas en la banda de 700 MHz en Tx/Rx son monopolos con base magnética con resonancia a 900 MHz originalmente; sin embargo, se ha modificado la longitud de las mismas con un pequeño tornillo metálico, como se ilustra en las Figs 3.9(a) y 3.9(b), para que aumente su longitud eléctrica permitiendo que se desplace el pico de resonancia a 700 MHz como se ilustra en la Fig 3.9(c). En la base se une un cable de 4 m. de longitud y conector SMA hembra. La ganancia de esta antena medida en cámara anecoica es $G = 0$ dB en el plano horizontal.

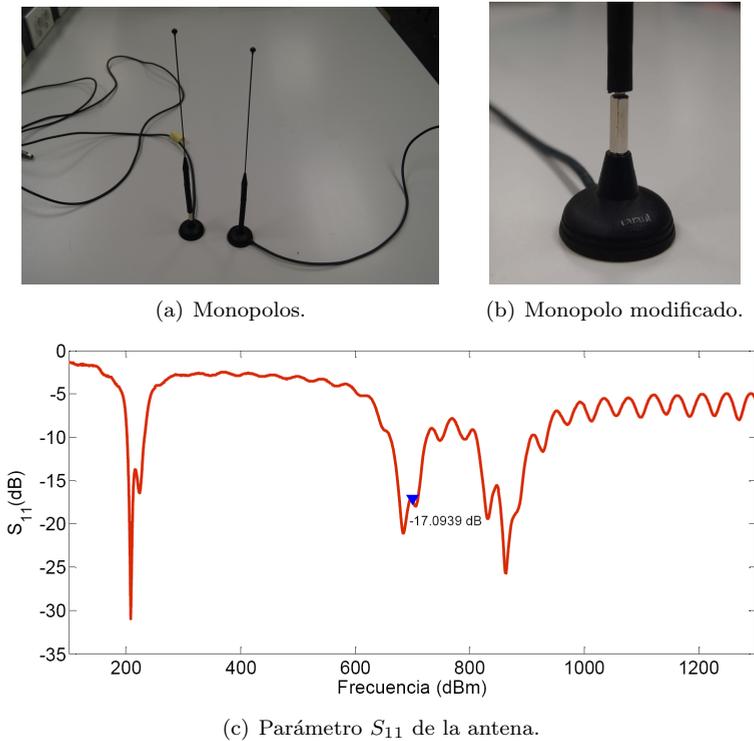


Figura 3.9: Monopolos con base magnética.

3.2.2.3. Amplificadores

Para la sonda de canal a 700 MHz ha sido necesario el uso de un amplificador de potencia ZHL-4240w en el Tx con una ganancia medida aproximada de 43,29 dB y en el Rx se ha utilizado un amplificador ZFL-2500 que proporciona una ganancia aproximada de 32,75 dB.

Por otra parte, los cables que unen los distintos elementos entre analizador de espectros y la antena son de la serie RG58, la atenuación total que sufre la señal a lo largo de 5 m. de longitud de cable es de 5 dB y los conectores introducen una atenuación de 0,5 dB.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

3.2.3. Equipos y cuestiones comunes para los dos sistemas

3.2.3.1. Sistema de alimentación de equipos

El sistema de medida implementado cuenta con una autonomía de alrededor de 1 h. y 45 min., gracias a que se ha utilizado un conjunto de baterías, (3 baterías en transmisión y 3 baterías en recepción de 75 A/H. cada una), las cuales proporcionan una corriente continua de 12 V. Posteriormente se realiza la conversión de corriente continua a corriente alterna con el uso de inversores (1 inversor en transmisión y 2 inversores en recepción). Se utilizan los inversores de firma HQ modelo INV1KW/12(F), los cuales son capaces de generar 230 V de corriente alterna a 50 Hz con una potencia máxima de salida de hasta 1000 W.

De este modo las batería en transmisión se harán cargo de alimentar los generadores de señal a 5,9 GHz y 700 MHz y la fuente alimenta los amplificadores de potencia. Por su parte, las baterías en recepción, alimentarán tanto a las fuentes que dan servicio a los sistemas de amplificación de la señal recibida como a los equipos encargados de tomar las medidas, ya sea el AE en el caso de la sonda de canal a 700 MHz, o el ARV cuando la sonda es la de 5,9 GHz.

Tras haber analizado los consumos de los equipos alimentados, se observa que el ARV es el equipo que más consume, y por tanto el que genera la restricción en cuanto al tiempo de medida. En la Fig. 3.9, se puede observar el sistema de alimentación a bordo del vehículo Tx y Rx.

La duración promedio de carga del conjunto de baterías es de aproximadamente 15 horas, (utilizando dos cargadores de baterías en paralelo), por lo que la máxima frecuencia con la que se han realizado las medidas es de cada dos días. El cargador empleado es un cargador de baterías electrónico Adamy 4E1200.

3.2.3.2. Cámara de vídeo

Se ha utilizado una cámara de vídeo con el objeto de disponer de registros de las condiciones en que se han realizado las medidas y de esta manera tener una herramienta adicional a la hora de realizar el análisis de los datos medidos, permitiendo obtener una mayor claridad de las condiciones del entorno de propagación en los instantes en los que se hicieron las medidas. Es decir, se pretende seleccionar los momentos en que se tiene visión directa (LOS, Line-Of-Sight) y no visión directa (NLOS, Non-LOS) entre el Tx y Rx, con el objeto de proporcionar resultados más precisos, al tener en cuenta los posibles efectos que se generan debido a la diversidad de condiciones y escenarios.

Para el sistema propuesto, se situó una cámara en la parte posterior del vehículo Rx el cual solía ir delante del Tx, recopilando todos los movimientos y cambios que se producen en los entornos medidos. De este manera, se propone un método a seguir para identificar si existe LOS o NLOS entre los vehículos

dados otros vehículos o agentes externos que puedan intervenir en el canal de propagación. Conviene resaltar que dicha cámara se encuentra sincronizada con los ordenadores utilizados en el sistema de medida.

Por otra parte, en los dos vehículos se llevan cámaras fotográficas con el propósito de registrar las condiciones especiales de propagación en momentos específicos.

3.2.3.3. Sistema de posicionamiento global

Para la caracterización experimental del canal de propagación en lo referente a el análisis de las pérdidas de propagación en función de la distancia de separación entre el Tx y Rx, se debe tener una referencia de la posición y la velocidad a la que se encuentran los vehículos Tx y Rx, así como también los instantes de tiempo en los que se realizaron las medidas. Para tal propósito se utilizaron dos GPSs, uno en el vehículo Tx y otro en el vehículo Rx, controlados de manera remota por PCs, los cuales adquieren dichos datos, que a su vez se envían vía serie al PC para su almacenado y posterior procesado. El envío de los datos se efectúa utilizando el cable conversor *USB to Serial Cable* de Sitecom, el cual permite establecer una conexión entre el puerto serie del GPS y el puerto USB del ordenador. Para que esta conexión se realice satisfactoriamente es necesario instalar el controlador del propio cable, encargado de gestionar el conversor RS-232 a USB, permitiendo velocidades de hasta 400 Mbps.

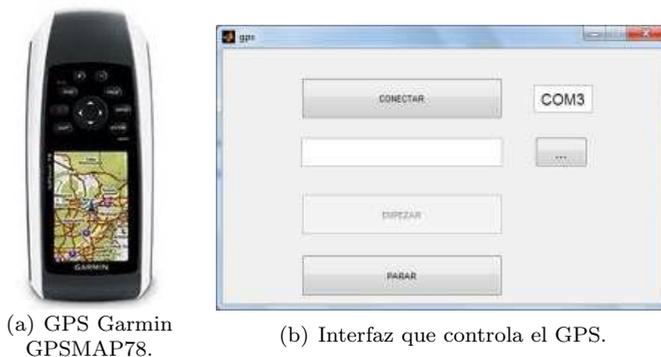


Figura 3.10: Equipo GPS e interfaz controladora.

El modelo de GPS utilizado es el GPSMAP78, el cual proporciona con una resolución temporal de 1 s, la hora UTC en la cual se ha tomado la medida, las coordenadas de latitud y longitud en grados y minutos, así como la velocidad en metros por segundo en las direcciones Norte/Sur y Este/Oeste. Con estos datos y después de un procesado se han obtenido la posición y distancia de separación

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

entre el Tx y Rx, así como sus velocidades relativas. En la Fig. 3.10(a) se muestra el GPS utilizado para el sistema de medida y en la Fig. 3.10(b) se observa la interfaz gráfica que controla el GPS.

3.2.3.4. Necesidad de sincronismo de datos

El sincronismo en el sistema de medida propuesto es algo crucial, de vital importancia, con el fin de que todas las medidas estén tomadas con el mismo sistema de referencia. Para conseguir dicho objetivo, los 5 ordenadores empleados en la adquisición de datos se han sincronizado en el tiempo. Al disponer el software de automatización y control de los equipos de instrucciones para recoger el tiempo en el cual se ha realizado cada medida, podemos, en el procesamiento de los datos, relacionar tanto las velocidades del Tx y del Rx, como la distancia separación entre ambos y el nivel de potencia recibida a 5,9 GHz y 700 MHz, observando el instante de tiempo en el que se ha producido cada una de ellas.

Además de esta idea global de la sincronización llevada a cabo en este sistema, es necesario disponer de mayor precisión. Esto es así porque el GPS es capaz de generar datos con las medidas de velocidad y posición con una periodicidad de 1 segundo. O lo que es lo mismo, que cada segundo obtenemos la posición y velocidad de ambos terminales GPS. Sin embargo, como se ha visto anteriormente, los instrumentos de medida son capaces de efectuar medidas y guardarlas a una frecuencia muy superior a la del GPS. Para solucionar dicho problema y poder relacionar cada medida de nivel de potencia con la posición a la que corresponde y a qué velocidad iban los terminales en dicho momento, nos hemos decantado por una interpolación lineal de los datos en el tiempo. Esto es, tomando como referencia los tiempos que nos proporcionan los receptores GPS y con ellos las coordenadas y la velocidad, y sabiendo que el tiempo de medida de potencia por parte de los equipos encargados para ello permanecen dentro de estos intervalos de tiempo, somos capaces de obtener la relación entre todos estos parámetros medidos. En la Fig. 3.11 se ilustra el proceso de sincronización.

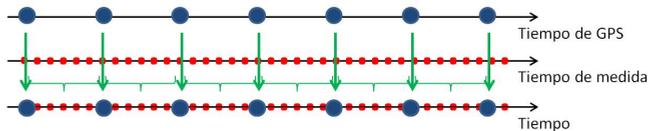


Figura 3.11: Sincronismo en las medidas.

3.2.4. Estación transmisora sistema V2I

Se ha diseñado una estación transmisora cuya especial característica es la capacidad de modificar la altura, desde 2 m. hasta 5,5 m., con el fin de modelar el comportamiento de un sistema de comunicaciones V2I, dado que los RSU suelen ir colocados en posiciones fijas a lo largo de caminos o carreteras, estaciones de servicio o aparcamientos, tales como paneles, semáforos etc.

Para el montaje se han necesitado: tres tubos de cobre de 2 m. con diferentes diámetros, abrazaderas de distintos tamaños, pletinas para conformar la sujeción de las antenas, un trípode de la cámara de vídeo, un mástil con base y las dos antenas ya empleadas en sistemas V2V.

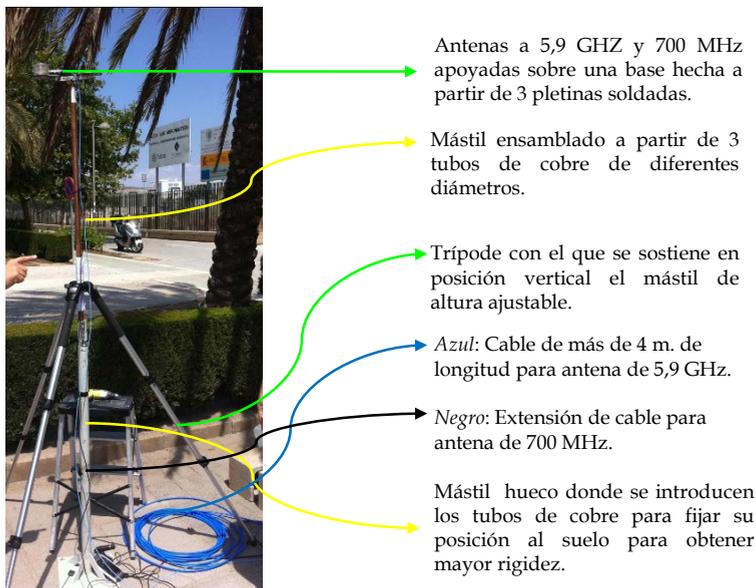


Figura 3.12: Mástil utilizado como antena del Tx para modelar sistemas V2I.

La idea de fabricar un mástil, con el cual conseguir diferentes alturas, se ha materializado utilizando 3 tubos con diferentes diámetros, de modo que se insertan unos dentro de otros. Previamente, se han establecido marcas para tramos de 50 cm con el fin de recoger medidas para alturas comprendidas entre los 2 m. y 5,5 m., en tramos de medio metro. Para fijar la altura deseada en un momento dado, se ha precisado de unas abrazaderas, las cuales harán de tope entre un tubo y otro. Una vez conseguido esto, el problema a solucionar venía a la hora de fijar las antenas en el tramo superior; para resolverlo, se han fabricado unas pletinas curvadas un ángulo de 90 grados soldadas a otra tercera de modo

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

que ésta se ha sujetado al tubo de cobre mediante otra abrazadera provista de un tornillo. Como la base de las antenas es imantada, no se han tenido inconvenientes en fijarlas cada una a una pletina con sólo dejarlas apoyadas.

Para mantener este mástil ajustable completamente vertical, se ha utilizado un trípode de una cámara de vídeo junto con un tubo hueco soldado sobre una base metálica. En la Fig. 3.12 se muestra el mástil utilizado como antena del Tx para modelar el sistema de comunicaciones V2I. También se muestran los dos cables que se han utilizado en las medidas (azul y negro), de más longitud con el fin de interconectar la altura máxima de la antena transmisora. El mástil se ha implementado cerca del vehículo Tx, de donde saldrán dichos cables.

En cuanto a la antena de GPS, ésta se ha colocado justo sobre la base blanca, a nivel del suelo, con el fin de evitar cualquier interferencia posible.

3.3. Balance de potencias

En este apartado se describen los cálculos realizados con los valores de ganancias y pérdidas de cada uno de los componentes que conforman los sistemas de medida propuestos anteriormente, 5,9 GHz y 700 MHz, con el propósito de modelar el comportamiento del *path-loss* en entornos vehiculares.

En sistemas V2V la ganancia de las antenas a considerar en el balance de potencia es constante e independiente de la distancia de separación entre el Tx y Rx, representada por d_{Tx-Rx} . Sin embargo, en sistemas V2I la ganancia de la antena está relacionada con la d_{Tx-Rx} y la altura de las antenas transmisora y receptora, representadas por h_{Tx} y h_{Rx} , respectivamente, debido a que el ángulo de la componente directa (en el Tx y Rx) representado por θ^D , varía para cada posición del Rx.

En la Fig. 3.13 se muestra el diagrama de radiación para las antenas utilizadas en las medidas. Los diagramas han sido medidos en la cámara anecoica sin plano de masa y con plano de masa. Según en el contexto que nos encontremos y si estamos en transmisión o en recepción, las antenas irán con plano de masa o no (por ejemplo, en recepción siempre nos interesa un monopolo con plano de masa debido al efecto del techo del vehículo).

3.3.1. Banda 5,9 GHz para V2V

En la Fig. 3.14 se muestra el esquemático del sistema de medida V2V a 5,9 GHz, ilustrando los componentes que se han utilizado para realizar el balance de potencias.

De acuerdo con las Ecs. (2.16) y (2.17), y tomando el nivel de la potencia recibida $P_R(d)$, como el referido a la entrada del ARV, siendo $P_T = -10$ dBm y restando las pérdidas de los cables $L_{cT_1} = 0,35$ dB, $L_{cT_2} = 4,68$ dB y $L_{cR} = 4,68$ dB, sumando las ganancias del amplificador $G_{AT} = 33,38$ dB en

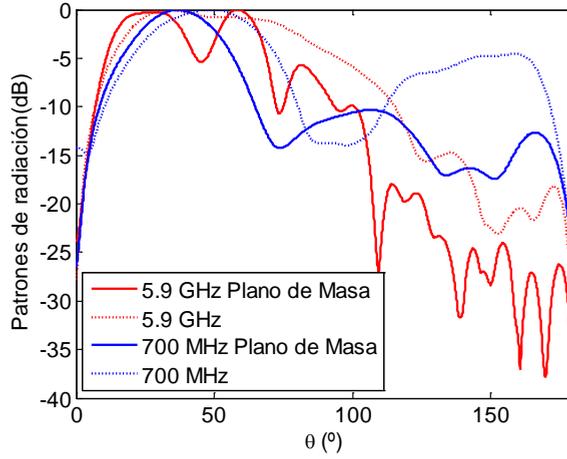


Figura 3.13: Diagrama de radiación de las antenas empleadas.

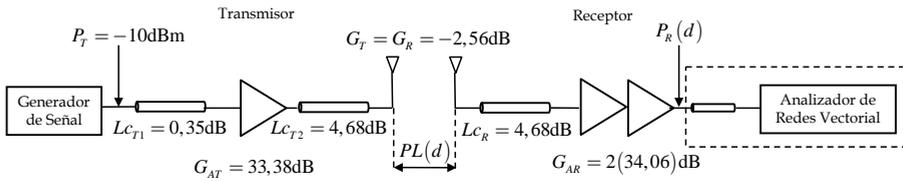


Figura 3.14: Esquemático sistema V2V a 5,9 GHz.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

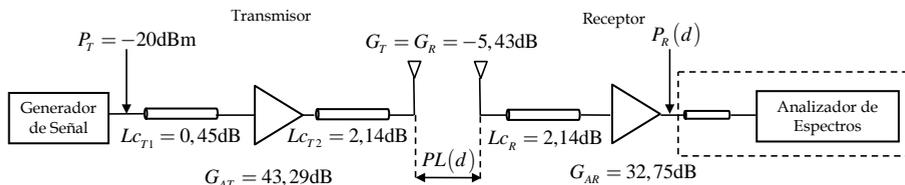


Figura 3.15: Esquemático sistema V2V a 700 MHz.

el Tx y los dos amplificadores en cascada $G_{AR} = 2 \cdot 34,06$ dB, en el Rx, y las ganancias de las antenas $G_T = G_R = 2,56$ dB, tanto en transmisión como en recepción, respectivamente, se tiene

$$P_R(d) = P_T - L_{CT1} + G_{AT} - L_{CT2} + 2 \cdot G_T - PL(d) - L_{CR} + G_{AR}, \quad (3.1)$$

donde,

$$P_R(d) = -10 - 0,35 + 33,38 - 4,68 + 2 \cdot (-2,56) - PL(d) - 4,68 + 2 \cdot 34,06. \quad (3.2)$$

Por lo cual, las pérdidas de propagación expresadas en dB son

$$PL(d) = 76,67 - P_R(d). \quad (3.3)$$

Tomando el parámetro $b_2(f)$, medido por el ARV como el valor de potencia recibida, se obtienen los registros para analizar el comportamiento del *path-loss* en función de la d_{Tx-Rx} .

3.3.2. Banda 700 MHz para V2V

Para el balance de potencias del sistema de medida a 700 MHz se realiza el mismo procedimiento que para el sistema de medida a 5,9 GHz, de acuerdo con el esquemático mostrado en la Fig. 3.15.

Tomando el nivel de la potencia recibida $P_R(d)$, como el referido a la entrada del AE, siendo $P_T = -20$ dBm y restando las pérdidas de los cables $L_{CT1} = 0,45$ dB, $L_{CT2} = 2,14$ dB y $L_{CR} = 2,14$ dB, sumando las ganancias de los amplificadores $G_{AT} = 43,29$ dB y $G_{AR} = 32,75$ dB y las ganancias de las antenas $G_T = G_R = -5,43$ dB, tanto en transmisión como en recepción, se obtiene

$$P_R(d) = P_T - L_{CT1} + G_{AT} - L_{CT2} + 2 \cdot G_T - PL(d) - L_{CR} + G_{AR}, \quad (3.4)$$

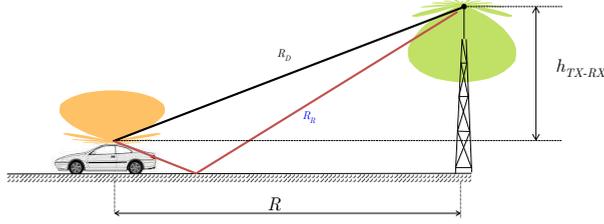


Figura 3.16: Modelos a dos rayos.

donde,

$$P_R(d) = -20 - 0,45 + 43,29 - 2,14 + 2 \cdot (-5,43) - PL(d) - 2,14 + 32,75. \quad (3.5)$$

Por lo cual, las pérdidas de propagación expresadas en dB son

$$PL(d) = 40,45 - P_R(d). \quad (3.6)$$

La Tabla 3.1 resume los principales parámetros que se han utilizado para la configuración de los sistemas de medida.

Parámetro	Sonda de canal 700 MHz	Sonda de canal 5,9 GHz
Potencia del Tx generador	-20 dBm	-10 dBm
Número de puntos	401	5000
Ancho de banda de IF	100 kHz	100 kHz
SPAN	0	0
Ganancia del sistema	60,45 dB	86,67 dB

Tabla 3.1: Parámetros de configuración del sistema de medidas.

3.3.3. Banda 5,9 GHz para V2I

Como se ha descrito en la sección 3.3, la ganancia de las antenas a considerar en el balance de potencia en sistemas V2I no es constante y depende de la d_{Tx-Rx} y h_{Tx} y h_{Rx} . En este sentido, el análisis de atenuación para los sistemas V2I difiere del realizado para el caso de los sistemas V2V. La Fig. 3.16 muestra el modelo a considerar en sistemas V2I.

Las pérdidas de propagación del canal radio V2I en condiciones de espacio libre, denotadas por $PL_{FS}(R_D)$, vienen dadas por

$$PL_{FS}(R_D) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R_D}{\lambda} \right), \quad (3.7)$$

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

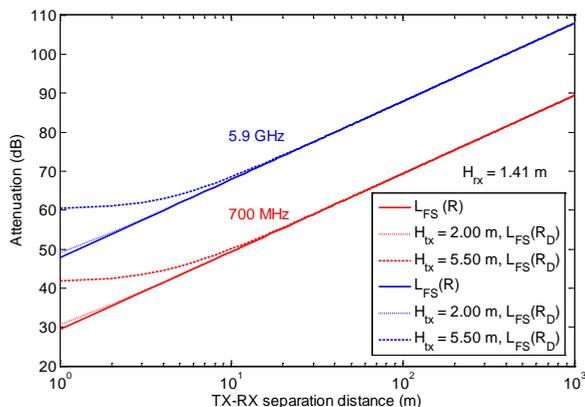


Figura 3.17: Efecto de las alturas sobre la atenuación.

la cual, se escribe en términos de la separación Tx-Rx, R , como

$$PL_{FS}(R) = 20 \log \left(\frac{4\pi \sqrt{(h_{Tx} - h_{Rx})^2 + R^2}}{\lambda} \right), \quad (3.8)$$

No obstante, se puede calcular la atenuación directamente a partir de la separación en horizontal entre el Tx y el Rx si se verifica que $R \equiv d_{Tx-Rx} \approx R_D$, a medida que d_{Tx-Rx} aumenta. En la Fig. 3.17 se muestra el efecto de la altura de las antenas sobre el cálculo de la atenuación en espacio libre al considerar R_D y R .

Como se observa, para una distancia superior a 10 m. la diferencia de atenuación en espacio libre al considerar R_D y R es mínima, convergiendo ambas para una distancia superior a 20 m. independientemente de la altura del Tx. Para distancias Tx-Rx de pocos metros las diferencias entre considerar R_D o R aumentan con la altura del Tx.

El comportamiento descrito anteriormente se debe a que para distancias superiores a 10 m. se cumplen, prácticamente condiciones de incidencia rasante, ($\theta_{tx}^D \approx \theta_{rx}^D \approx 90^\circ$) como se observa en la Fig. 3.18.

Por otra parte, debido a las características del diagrama de radiación de las antenas, en la Fig. 3.19 se observa como el efecto de atenuación a a 5,9 GHz es menor que a 700 MHz. Para distancias superiores a 20 m., la atenuación a 700 MHz es aproximadamente 25,3 dB, mientras que para 5,9 GHz el factor de atenuación se reduce a 12,5 dB. También se observa cómo para distancias por debajo de 10 m., la atenuación es menor ubicando la antena en el Tx invertida. A partir de esta distancia, como consecuencia de incidencia casi rasante, el factor de atenuación es independiente de la orientación de la antena del Tx.

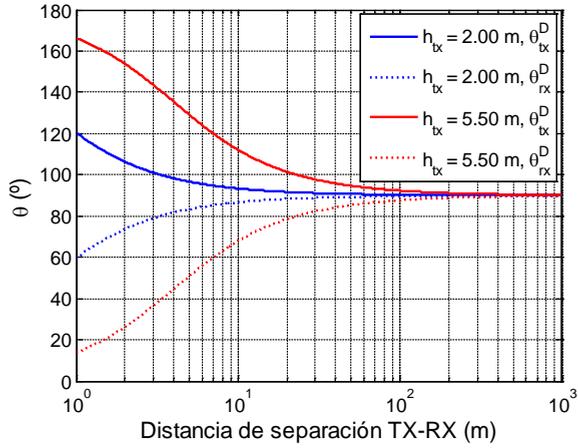


Figura 3.18: Ángulo en función de la distancia de separación Tx-Rx.

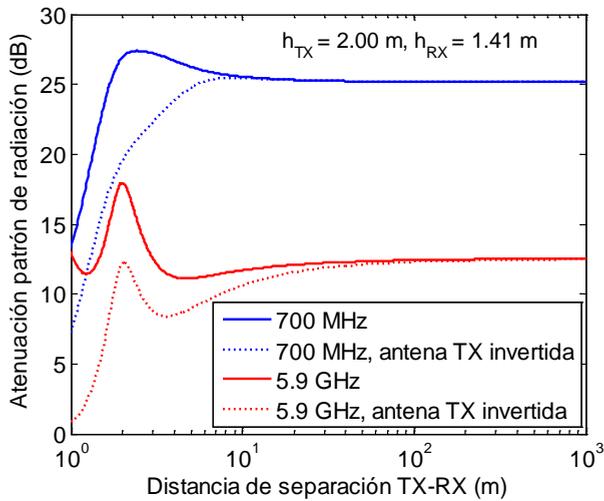


Figura 3.19: Patrón de radiación para la atenuación.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

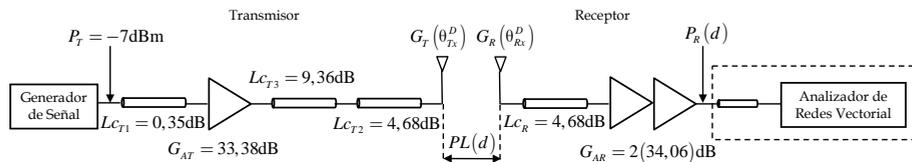


Figura 3.20: Esquemático sistema V2I a 5,9 GHz.

En la Fig. 3.20 se muestra el esquemático del sistema de medida V2I a 5,9 GHz, ilustrando los componentes que se han utilizado para realizar el balance de potencias.

A diferencia del esquemático del sistema V2V a 5,9 GHz, en este caso, aparece un valor de atenuación adicional generado por el cable que se ha utilizado para interconectar los equipos con la antena del Tx, dado por L_{cT3} . Asimismo, como se ha comentado anteriormente aparecen ganancias que dependen de los ángulos de la componente directa entre Tx y el Rx denotadas por $G_T(\theta_{Tx}^D)$ y $G_R(\theta_{Rx}^D)$, respectivamente. Tomando el nivel de la potencia recibida $P_R(d)$, como el referido a la entrada del ARV, siendo $P_T = -7$ dBm y, restando las pérdidas de los cables $L_{cT1} = 0,35$ dB, $L_{cT2} = 4,68$ dB, $L_{cT3} = 9,36$ dB y $L_{cR} = 4,68$ dB y por último sumando las ganancias del amplificador $G_{AT} = 33,38$ dB en el Tx, los dos amplificadores en cascada $G_{AR} = 2 \cdot 34,06$ dB, en el Rx, y las ganancias de las antenas $G_T(\theta_{Tx}^D)$ y $G_R(\theta_{Rx}^D)$, se obtiene

$$P_R(d) = P_T - L_{cT1} + G_{AT} - L_{cT2} - L_{cT3} + G_T(\theta_{Tx}^D) - PL(d) + G_R(\theta_{Rx}^D) - L_{cR} + G_{AR}. \quad (3.9)$$

Reemplazando los valores dados para cada variable se obtiene,

$$P_R(d) = 75,43 + G_T(\theta_{Tx}^D) + G_R(\theta_{Rx}^D) - PL(d). \quad (3.10)$$

Por tanto, las pérdidas de propagación expresadas en dB son

$$PL(d) = 75,43 - P_R(d) + G_T(\theta_{Tx}^D) + G_R(\theta_{Rx}^D). \quad (3.11)$$

Al escribir la expresión anterior en términos de los diagramas de radiación se debe tener en cuenta que $G_T(\theta_{Tx}^D) = G_T^{\text{máx}}(\text{dB}) + t(\theta_{Tx}^D)$ y $G_R(\theta_{Rx}^D) = G_R^{\text{máx}}(\text{dB}) + t(\theta_{Rx}^D)$.

Tomando $G_T^{\text{máx}} = 3,47$ dB y $G_R^{\text{máx}} = 5,44$ dB se llega a

$$PL(d) = 84,34 - P_R(d) + t(\theta_{Tx}^D) + t(\theta_{Rx}^D). \quad (3.12)$$

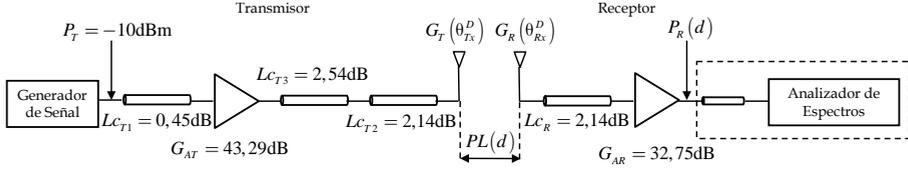


Figura 3.21: Esquemático sistema V2I a 700 MHz.

3.3.4. Banda 700 MHz para V2I

Para el balance de potencias del sistema de medida V2I a 700 MHz se realiza el mismo procedimiento que para el sistema de medida a 5,9 GHz, de acuerdo con el esquemático mostrado en la Fig. 3.21.

Tomando el nivel de la potencia recibida $P_R(d)$, como el referido a la entrada del ARV, siendo $P_T = -10$ dBm, restando las pérdidas de los cables $L_{cT1} = 0,45$ dB, $L_{cT2} = 2,14$ dB, $L_{cT3} = 2,54$ dB y $L_{cR} = 2,14$ dB, y por último sumando las ganancias de los amplificadores $G_{AT} = 43,29$ dB, $G_{AR} = 32,75$ dB, en el Tx y Rx, respectivamente, y de las antenas $G_T(\theta_{Tx}^D)$ y $G_R(\theta_{Rx}^D)$, en el Tx y Rx, respectivamente, se obtiene

$$P_R(d) = P_T - L_{cT1} + G_{AT} - L_{cT2} - L_{cT3} + G_T(\theta_{Tx}^D) - PL(d) + G_R(\theta_{Rx}^D) - L_{cR} + G_{AR}. \quad (3.13)$$

Reemplazando los valores dados para cada variable se llega a

$$P_R(d) = 58,77 + G_T(\theta_{Tx}^D) + G_R(\theta_{Rx}^D) - PL(d). \quad (3.14)$$

Por tanto, las pérdidas de propagación expresadas en dB son

$$PL(d) = 58,77 - P_R(d) + G_T(\theta_{Tx}^D) + G_R(\theta_{Rx}^D). \quad (3.15)$$

Teniendo en cuenta las mismas consideraciones que para el caso del sistemas V2I a 5,9 GHz al escribir la expresión anterior en términos de los diagramas de radiación y tomando $G_T^{m\acute{a}x} = 3,2$ dB y $G_R^{m\acute{a}x} = 5,57$ dB se obtiene

$$PL(d) = 67,45 - P_R(d) + t(\theta_{Tx}^D) + t(\theta_{Rx}^D). \quad (3.16)$$

3.4. Descripción de los escenarios de propagación y planificación de la campaña de medidas

En [57] el autor propone un esquema de clasificación de los escenarios de propagación para los canales V2V, en función del tipo de área, es decir, abierta (urbano, suburbano, rural y de autovía), semi-cerrada (túneles) y cerrada (aparcamientos y garajes). En esta sección se hace una breve descripción de los diferentes escenarios de propagación seleccionados para realizar la campaña de medidas. Dichos escenarios se han escogido tratando de cubrir la mayor cantidad de situaciones reales que se puedan presentar en entornos de redes de comunicación vehicular. De igual manera se ilustra la planificación que se ha llevado a cabo, para realizar la campaña de medidas, a través del GRE del instituto de investigación iTEAM de la Universitat Politècnica de València, con la que se han analizado los parámetros que caracterizan experimentalmente el canal de propagación vehicular.

3.4.1. Introducción

En una campaña de medidas de canal se persigue adquirir datos durante un periodo concreto de tiempo, buscando tomar el mayor número de medidas para los diferentes escenarios de propagación, con el objeto de hacer una caracterización experimental del canal de propagación, estudiando y analizando el comportamiento de los parámetros que llevan a conseguir dicho objetivo. En este sentido, se hace necesario que el número de medidas sea lo más extenso posible, teniendo como finalidad, la posterior fiabilidad de los resultados obtenidos durante el procesado estadístico realizado con dicha información.

La heterogeneidad de los escenarios de propagación hace necesario que se realice una buena planificación al escoger las zonas donde se han de llevar a cabo las medidas con el propósito de proponer resultados que den lugar a la generación de modelos de propagación más precisos, que describan el comportamiento de las pérdidas de propagación en función del escenario de propagación donde se este llevando a cabo la comunicación vehicular. En cada escenario la velocidad de los terminales, la posición relativa entre Tx y Rx, la posición de los *scatters* y todos los elementos que intervienen en la propagación de las señales, varían de forma muy sustancial.

Por lo tanto, es importante tener en cuenta la velocidad a la que se permite circular en la calzada, la forma de la misma, la densidad de tráfico rodado y la densidad y tipo de construcciones que nos encontramos en torno a la calzada. A continuación, en la sección 3.4.2 se describen los escenarios de propagación ilustrando algunos de los instantes en los cuales se han realizado la campaña

3.4 Descripción de los escenarios de propagación y planificación de la campaña de medidas

de medidas, y en la sección 3.4.3 se presenta el diseño de la planificación que se ha realizado para el desarrollo de dicha campaña de medidas.

3.4.2. Descripción de los escenarios de propagación

A la hora de pretender caracterizar el canal de propagación dentro de una zona determinada, se precisa seleccionar entornos con los que se pueda modelar de la mejor manera posible el comportamiento de situaciones reales de propagación para los sistemas de comunicación vehicular, teniendo en cuenta los diferentes escenarios que se puedan presentar en barrios, ciudades, países.

Evidentemente, las características del escenario difieren en primera estancia entre pueblos o ciudades de un mismo país y ni que decir entre diferentes países y ciudades del mundo. La clasificación que vamos a seguir, se corresponde con escenarios que normalmente podemos encontrar en una ciudad europea, es decir, escenarios urbano de alta densidad de tráfico (urbano A-D), urbano con moderada/baja densidad de tráfico (urbano B-D), suburbano, rural y de autovía.

3.4.2.1. Urbano alta densidad

Las medidas en entorno urbano con alta densidad se han llevado a cabo en grandes avenidas con hasta cinco carriles con una densidad de tráfico medio de alrededor de 44200 vehículos/24 h. La longitud total de los recorridos medidos fue cerca de 46 km. Este escenario corresponde a algunas avenidas de la ciudad de Valencia, como por ejemplo la Avenida del Puerto (un solo sentido de circulación), y la avenida Blasco Ibañez (dos sentidos de circulación), con 5 y 4 carriles de tráfico rodado, en cada dirección respectivamente. Las avenidas presentan aproximadamente 30 m. de ancho, incluyendo zonas de aparcamiento de coches y aceras en ambos lados de la vía. La Fig 3.22 muestra una vista del escenario de medida, donde puede verse el vehículo Rx, que circula delante del Tx.

3.4.2.2. Urbano baja densidad

Las medidas en entorno urbano con baja densidad se han obtenido en áreas urbanas con una densidad de tráfico medio de alrededor de 7500 vehículos/24 h y con uno o dos carriles en una sola dirección. La longitud total de los recorridos medidos fue cerca de 31 km.

Para el caso de las ciudades europeas, como puede ser el caso de Valencia, que es donde se han llevado a cabo las medidas, debido a su evolución histórica, nos vemos ante la necesidad de hacer una distinción más minuciosa de los entornos urbanos de baja densidad que la componen. Esto se debe a que no todas las zonas presentan la misma densidad de tráfico, ni las calles son igual

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

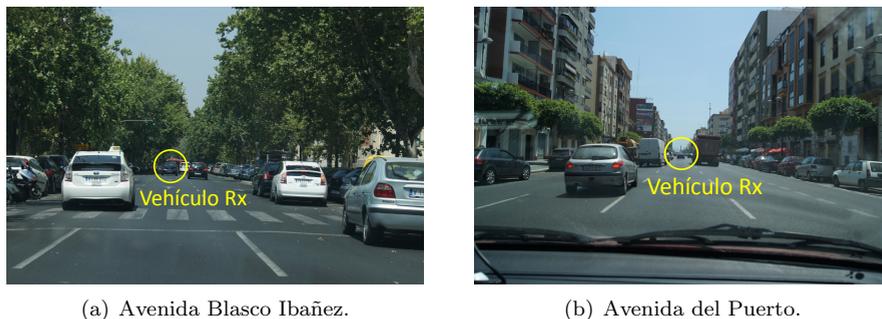


Figura 3.22: Escenario urbano de alta densidad de tráfico rodado

de anchas; posiblemente la construcción no sea la misma o hasta incluso, los edificios que las rodean no tienen las mismas características. En este sentido, se ha optado por hacer una sub-clasificación de los entornos urbanos de baja densidad, de la siguiente manera:

Casco antiguo

El término casco antiguo define el núcleo histórico y monumental de las ciudades europeas. El casco antiguo se caracteriza por sus calles estrechas; en la mayoría de los casos suelen estar adoquinados, con un único carril de circulación y envueltas por edificios de unos 20 m. de altura, lo cual genera en muchas ocasiones aspecto tubular. La tumultuosa forma de dichas calles es muy difícil de generalizar; abundan las curvas y las intersecciones con otras calles de las mismas características. También existen situaciones donde encontramos coches estacionados a ambos lados de la calle. En la Fig. 3.23 se muestran varios ejemplos de dicho entorno. Las Figs. 3.23(a) y 3.23(b) ilustran situaciones en donde se tienen condiciones LOS y las Figs. 3.23(c) y 3.24(d) ilustran situaciones de condiciones NLOS. La densidad de tráfico en los cascos histórico es muy baja, apenas circulan coches; sin embargo abundan los peatones y las calles prácticamente peatonales.

Ensanche

El ensanche es una zona urbana con el cual se ha pretendiendo ampliar las ciudades debido al crecimiento demográfico de los cascos antiguos a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. En la mayoría de los casos ha sido un crecimiento mallado el cual se practicaba normalmente mediante urbanismo planificado, por lo que solían desarrollarse mediante un plano en cuadrícula o plano ortogonal. Esta es la razón por la que la característica principal de los ensanches en este período histórico es que presentan calles sin curvas, largas y formando claros ángulos con sus intersecciones pero con la peculiaridad de poseer chaffán.

3.4 Descripción de los escenarios de propagación y planificación de la campaña de medidas



(a) Condiciones LOS.



(b) Condiciones LOS.



(c) Condiciones NLOS.



(d) Condiciones NLOS.

Figura 3.23: Casco antiguo

En nuestra campaña se han realizado mediciones en entornos de este tipo. Concretamente en el ensanche de los alrededores de Gran Vía Marqués del Turia, con manzanas cuadradas, achaflanadas y cruces con gran visibilidad. Algunas características de esta zona se muestran en la Fig. 3.24; conviene resaltar que este tipo de entorno además ha sido de especial interés para realizar medidas en sistemas de comunicación V2I.

Zona residencial

Son zonas de nueva construcción, correspondientes a los últimos 20 años. Se caracterizan por poseer más espacios abiertos que el resto de entornos urbanos. Predominan los espacios ajardinados y numerosas construcciones sin un patrón fijo. Se encuentran situadas a las afueras del núcleo de la población, de forma que en la mayoría de situaciones las calles son de doble sentido y encontramos coches estacionados a ambos lados de la calle. En la Fig. 3.25 se muestran varios ejemplos de las condiciones en que se han realizado las medidas en este entornos. Cabe resaltar que este tipo de entorno ha sido de especial interés para realizar mediciones para comunicación V2V basada en cruces.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN



(a) Medidas V2V.



(b) Instalación del mástil y antenas en Tx.



(c) Vehículo Rx se aleja.



(d) Vehículo Rx se acerca.

Figura 3.24: Ensanche

3.4.2.3. Escenario suburbano

Los entornos suburbanos son vías principales que comunican diferentes distritos de la ciudad y en las cuales convergen las vías secundarias. Están constituidas principalmente por avenidas y circunvalaciones, de forma que generan un aspecto de anillo en las ciudades. Permiten que la circulación sea más fluida en toda la población, poseen varios carriles de circulación y en algunos casos existen espacios verdes en sus alrededores.

Las medidas para este entorno se desarrollaron en calles y avenidas fuera del centro de la ciudad, caracterizado por una densidad de tráfico medio de alrededor de 7100 vehículos/24 h con dos o tres carriles en ambas direcciones. La longitud total de los recorridos medidos fue de cerca de 9 km. En la Fig. 3.26 se muestran varios ejemplos de este entorno ilustrando condiciones LOS y NLOS.

3.4.2.4. Escenario rural

Las medidas en este entorno fueron realizadas en grandes vías con un carril en ambas direcciones a las afueras de la ciudad. Se caracteriza por ser una área abierta con vegetación y muy pocas edificaciones a su alrededor, con una baja

3.4 Descripción de los escenarios de propagación y planificación de la campaña de medidas

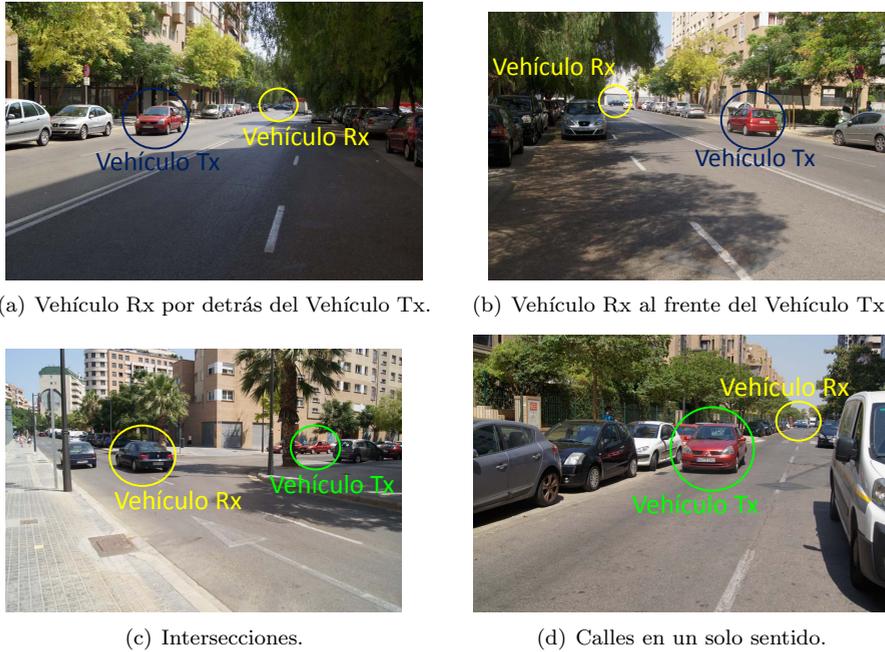


Figura 3.25: Zona residencial

densidad de tráfico. La longitud total de los recorridos medidos fue de cerca de 14 km. La Fig. 3.27 muestra este tipo de entorno.

3.4.2.5. Escenario de autopista

Los escenarios de autopista, se utilizan para establecer conexiones entre ciudades y municipios. Se caracterizan por ser vías rápidas, seguras, que admiten un volumen de tráfico considerable, y que disponen de diversos carriles para cada sentido con calzadas separadas. Las medidas para el entorno de autopista fueron realizadas en vías con dos o tres carriles en ambas direcciones, con media y alta densidad de tráfico. Ambos lados de las vías generalmente son áreas abiertas y la longitud total de los recorridos medidos fue de cerca de 51 km. En la Fig. 3.28 se ilustran varios ejemplos de este tipo de entorno.

Es importante destacar que las medidas se realizaron con los vehículos Tx/Rx circulando en el mismo sentido; el vehículo Tx detrás del vehículo Rx, y en condiciones reales de conducción para todos los entornos. Para los escenarios urbanos la velocidad límite permitida oscila entre 30 y 50 km/h, para los escenarios rural y suburbano la velocidad límite es de 80 km/h, mientras que

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN



(a) Condiciones LOS.



(b) Condiciones LOS.



(c) Condiciones NLOS.



(d) Condiciones NLOS.

Figura 3.26: Escenarios suburbanos



(a) Condiciones LOS.



(b) Condiciones LOS.

Figura 3.27: Escenarios rurales

para el escenario de autovía la velocidad límite es de 120 km/h. La mayoría de las medidas se se realizaron días laborales entre las 10:00 y 13:00 horas.

3.4 Descripción de los escenarios de propagación y planificación de la campaña de medidas



Figura 3.28: Escenarios de autovía

3.4.3. Planificación de nuestra campaña de medidas

En este apartado se describe la organización que se ha realizado para llevar a cabo la campaña de medidas, teniendo en cuenta los diferentes entornos que se han encontrado en la ciudad de Valencia. Se ha establecido una planificación de nuestra campaña de medidas, distribuyendo cada una de las salidas en función del entorno a medir, teniendo en cuenta las condiciones de tráfico, la hora del día y con la limitación de que el tiempo máximo de medida es de aproximadamente 2 horas, tiempo promedio de autonomía que las baterías nos proporcionan.

Por cuestiones técnicas de logística y de infraestructura se ha llevado a cabo una primer campaña de medidas para sistemas de comunicaciones V2V, dejando una segunda campaña de medidas para sistemas V2I y algunas V2V en condiciones particulares de cruces. A continuación se presenta a manera de ejemplo, algunas consideraciones de la salida preliminar y la organización de la campaña de medidas para cada uno de los casos comentados anteriormente.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

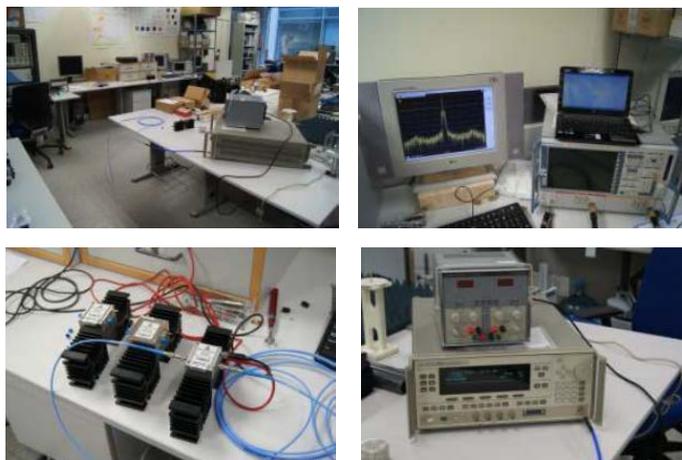


Figura 3.29: Pruebas en el laboratorio a 5,9 GHz.

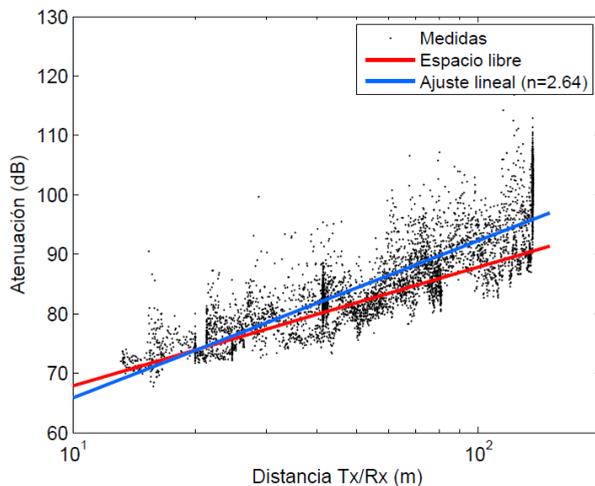
3.4.3.1. Salida preliminar

Después de realizar varias pruebas en el laboratorio del grupo de investigación GRE, (ver Fig. 3.29), el día 08 de febrero de 2012 se inició nuestra campaña de medidas en sitio con una salida preliminar, con el objeto de poner a punto el sistema de medidas a 5,9 GHz.

Como ejemplo ilustrativo, en la Fig.3.30(a) se muestra el *path-loss* para estas medidas preliminares tomadas en la Avenida de los Naranjos de la ciudad de Valencia [56]. Se trata de una avenida de 1,7 km de longitud, con 4 carriles de tráfico rodado para cada sentido de circulación, separados por dos vías de tranvía. La avenida tiene aproximadamente 67 m. de ancho, contando las zonas de aparcamiento en batería, disponibles a ambos lados, y las aceras. La avenida separa la Universitat Politècnica de València y la Universitat de València, por lo que a ambos lados hay amplios espacios abiertos, alternando con edificios próximos a la calzada no muy altos, con una altura que oscila entre 20 m. y 30 m. aproximadamente, y árboles de mediana altura lo largo de toda la avenida situados a ambos lados. Las características morfológicas del escenario de medida se asemejan a lo que en la literatura viene a denominarse zona suburbana [7],[29]. En las Figs. 3.30(b) y 3.30(c) se ilustran las vistas de la zona urbana. Se ha indicado con trazo rojo el recorrido seguido por los vehículos Tx-Rx.

Las medidas se realizaron con los vehículos Tx-Rx circulando en el mismo sentido, recorriendo varias veces la avenida en un trayecto total superior a 10 km. Las medidas se realizaron un día laboral (miércoles) entre las 11:30 y las

3.4 Descripción de los escenarios de propagación y planificación de la campaña de medidas



(a) *Path-loss*.



(b) vista entorno urbano 3D.

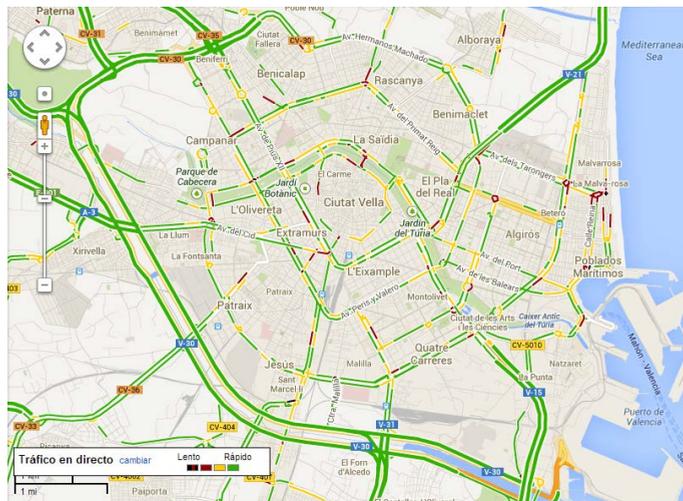


(c) Vista desde el vehículo Tx.

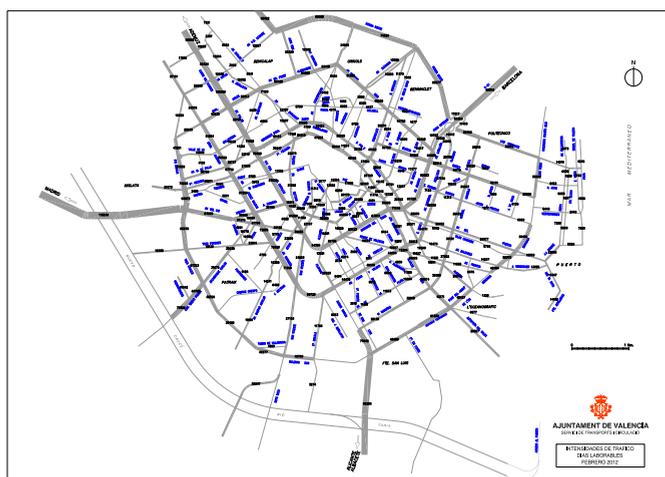
Figura 3.30: Medidas *path-loss* a 5,9 GHz.

13:00 horas, con una intensidad media de tráfico rodado de 2022 vehículos/hora, según los datos proporcionados por el Ayuntamiento de Valencia. Las medidas se realizaron en la mayor parte del tiempo en condiciones de visión directa, si bien por cuestiones de circulación hubo momentos en los que se interponía algún vehículo entre el Tx y Rx, obstruyendo la línea de visión directa, sobre todo cuando se pretendía aumentar la distancia de separación entre Tx-Rx.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN



(a) Condiciones del tráfico en la ciudad de Valencia.



(b) Datos de la densidad de tráfico rodado en la ciudad de Valencia.

Figura 3.31: Carreteras de la provincia de Valencia

3.4.3.2. Campaña de medidas

Con el propósito de elegir las zonas más adecuadas para realizar la campaña de medidas, se ha realizado un análisis teniendo en cuenta los planos de la ciudad de Valencia con información de la fluidez del tráfico y otro con el nivel de

3.4 Descripción de los escenarios de propagación y planificación de la campaña de medidas

tráfico rodado medio en vehículos por hora como se muestra en las Figs. 3.31(a) y 3.31(b), respectivamente.

De este modo comenzamos por observar una serie de avenidas y circunvalaciones que forman una especie de anillos concéntricos alrededor de Valencia. Los cuales y de acuerdo con sus características se han definido en la sección 3.4.2.3 como escenarios suburbanos. En la Fig. 3.32 se ilustra en trazo amarillo los trayectos recorridos de dicho escenario.

Desplazándonos hacia el interior en los anillos concéntricos, encontramos un escenario claramente urbano: las avenidas y calles tienen un intensidad media o alta de tráfico rodado, poseen no más de dos o tres carriles por sentido de circulación y forman parte de las vías más recorridas en los trayectos dentro de la propia ciudad. Los trayectos recorridos en los que se han realizado medidas se ilustran con trazo rojo en la Fig. 3.32.



Figura 3.32: Medidas escenarios suburbano, y urbanos de alta y baja densidad de tráfico rodado.

Dentro de este escenario urbano, se han seleccionado unas zonas con características especiales e interesantes para la caracterización del canal. Así encontramos la zona del casco antiguo de la ciudad, descrita en la sección 3.4.2.2, donde calles estrechas y sin una forma definida, ver Fig. 3.33(a), se juntan con pequeñas plazas, intersecciones abruptas y calles peatonales adoquinadas con gran afluencia de peatones. También encontramos una zona especial dentro de este casco antiguo como lo es la Plaza del Ayuntamiento ver Fig. 3.33(b). Otra zona muy particular es el ensanche, descrita en la sección 3.4.2.2, en el que existe una tendencia de construcción con formas geométricas.

En la Fig. 3.32 se ilustra con trazo verde los trayectos recorridos en los que se han realizado medidas para los escenarios urbanos de baja densidad de tráfico rodado descritos anteriormente. También se ilustra la zona del Cabañal.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN



(a) Calles estrechas.

(b) Av. del Marqués de Sotelo.

Figura 3.33: Casco Antiguo.

A las afueras de la ciudad se encuentran los escenarios de autovía, descritos en la sección 3.4.2.5. En estos se busca estudiar cómo influye la alta velocidad de los terminales, los otros coches y demás difusores que se encuentran alrededor y el alcance máximo entre Tx y Rx tratando de modelar condiciones normales de conducción. En la Fig. 3.34 se muestra con trazo rojo los trayectos recorridos para realizar las medidas.



Figura 3.34: Medidas escenarios rural y de autovía.

De igual manera, otro de los escenarios donde se ha llevado a cabo la campaña de medidas, es el escenario rural. En la Fig. 3.34 se muestran con trazo verde los trayectos recorridos para tal propósito.



Figura 3.35: Vista en planta vía de servicio.

3.5. Calibración del sistema

En este apartado se describe la metodología llevada a cabo con el objeto de calibrar el sistema de medida. En primer lugar se ha escogido una zona donde se considera que se cuenta con propagación en espacio libre, es decir, un entorno libre de obstáculos y dispersores, para realizar las medidas (ver Fig. 3.35). Se trata de la vía de servicio en el polígono de Puerto de Sagunto, con amplios espacios abiertos.

En la Fig. 3.36, se muestra el comportamiento de las pérdidas de propagación para el escenario mostrado en la Fig. 3.35 a 700 MHz. Con trazo rojo se han indicado las muestras de las pérdidas de propagación en función de la distancia de separación Tx-Rx, para el caso cuando el Tx se encuentra parado y se va alejando el Rx y con trazo azul para el caso cuando el Rx se encuentra parado y el Tx. De igual manera, se muestra el ajuste del modelo a dos rayos sugerido en [12] para condiciones LOS particularmente utilizado en escenario rural, (ver sección 2.3.1.2), para un valor de $\rho = -1$. Como era de esperar, las muestras se ajustan muy bien al modelo a doble rayo.

Con el propósito de mostrar la precisión del ajuste del modelo a dos rayos a los registros obtenidos en nuestra campaña de medidas se ha analizado el comportamiento de las pérdidas de propagación de dichos registros para una ubicación dentro del polígono a 5,9 GHz. De esta manera se ha corroborado la validez del cálculo de balance de potencias y por tanto, se ha verificado que no se precisa ningún tipo de ajuste o calibrado. En la Fig. 3.37 se muestra la

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIDA Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PROPAGACIÓN

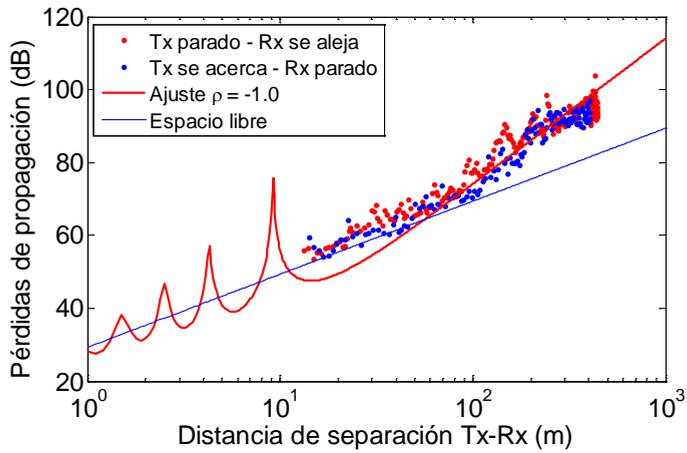


Figura 3.36: Pérdidas de propagación vía de servicio, polígono y modelo teórico a dos rayos a 700 MHz.



Figura 3.37: Vista en planta tramo recto dentro del polígono.

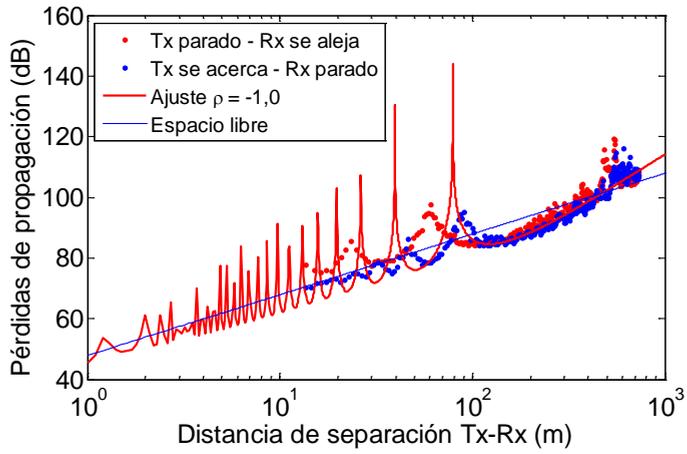


Figura 3.38: Pérdidas de propagación dentro del polígono y modelo teórico a dos rayos a 5,9 GHz.

vista en planta de un tramo recto dentro del polígono. Sus correspondientes resultados a 5,9 GHz se muestran en la Fig. 3.38.

Capítulo 4

Resultados experimentales V2V

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la campaña de medidas del canal V2V, llevada a cabo en la ciudad de Valencia, España. Se han realizado medidas en los entornos descritos en la sección 3.4.2; es decir, urbanos con alta densidad de tráfico rodado, urbanos con baja densidad de tráfico rodado, suburbanos, rurales y autovía, con el propósito de realizar una caracterización experimental del canal de comunicaciones V2V en banda estrecha.

Para el análisis de los registros obtenidos en la campaña de medidas se han propuesto cuatro métodos de procesamiento identificando el escenario de propagación donde fueron medidos. En el primer método se fusionan todos los registros realizando un análisis en conjunto. En el segundo método se analizan los registros por separado, En el tercer método se realiza un análisis por medio de un algoritmo de ventana deslizante y por último proponemos un método por vídeo. En todos los casos el objetivo es obtener los parámetros que caracterizan las pérdidas de propagación en función del entorno bajo estudio. De este modo, el análisis relaciona la atenuación que introduce el canal de comunicaciones con la distancia de separación entre el Tx-Rx.

Conviene destacar que el modelo a seguir, será un modelo logarítmico, de la forma $L = L_0 + 10\gamma \log_{10} d$, (ver sección 2.3.1), de modo que mediante el ajuste lineal por mínimos cuadrados de los datos experimentales, se puedan obtener valores para el exponente de pérdidas γ , las pérdidas de propagación

L_0 a una distancia de referencia d_0 y la desviación típica σ_S , con los cuales se ha de caracterizar con mayor precisión las pérdidas del entorno.

En la sección 4.2 se presenta una breve descripción de los métodos propuestos para el procesado de los registros obtenidos de la campaña de medidas. A continuación, en la sección 4.3 se proporcionan los resultados de los diferentes parámetros, clasificados en función del escenario de propagación tanto a 700 MHz como a 5,9 GHz, lo cual permite evaluar las diferencias de los parámetros del modelo de pérdidas de propagación en función del escenario de medida y la banda de frecuencias donde serán implementados. Al final se presenta una comparación de los resultados de esta investigación con resultados publicados por otros autores.

4.2. Metodología y análisis de las medidas

4.2.1. Metodología

Para el procesado de los registros obtenidos en la campaña de medidas, se realizó una selección en función de los escenarios de propagación, analizando el comportamiento de las pérdidas de propagación en función de la distancia de separación entre el Tx-Rx, modelo a una pendiente (ver Ec. (2.23)). Posteriormente se ha efectuado un proceso de filtrado de los registros con el propósito de obtener una mayor precisión en los valores de los parámetros de dicho modelo de pérdidas.

4.2.2. Métodos de análisis

A continuación se describen los métodos de procesado propuestos para el análisis de los registros obtenidos en la campaña de medidas con el objeto de caracterizar el canal V2V en banda estrecha.

4.2.2.1. Fusión de registros

Es un método de procesado convencional, en el cual se fusionan los registros obtenidos en la campaña de medidas, de 5 y 10 minutos, clasificándolos por escenario de propagación, obteniendo de esta manera un registro de datos total, al cual se le realiza un ajuste lineal por mínimos cuadrados para obtener los parámetros que caracterizan las pérdidas de propagación.

4.2.2.2. Registros individuales

En este método se realiza un ajuste lineal por mínimos cuadrados a cada uno de los registros de manera individual, con lo que se obtienen los parámetros para la caracterización de las pérdidas de propagación por registro, clasificados

por escenario de propagación. Posteriormente se procede a obtener los valores máximos, medios y mínimos de cada uno de dichos parámetros, con lo cual se efectúa la caracterización de las pérdidas de propagación.

4.2.2.3. Algoritmo de ventana deslizante

Al implementar este método, se propone una nueva manera de procesar los registros. El objetivo es evaluar los parámetros que caracterizan las pérdidas de propagación tomando ventanas de las muestras de los registros y realizando un barrido de la ventana de trabajo hasta completar el total de las muestras del registro que se este procesando. Lo cual nos permite obtener diferentes valores de cada uno de los parámetros que caracterizan las pérdidas de propagación y de esta manera evaluar el comportamiento de dichos parámetros, para su posterior análisis.

Cabe resaltar que el tamaño óptimo de la ventana es dependiente de las condiciones con las que se han obtenido los registros de medidas; es decir, no existe una tendencia a la hora de escoger el tamaño de dicha ventana, sino que depende del registro en particular que se este analizando.

4.2.2.4. Condiciones LOS-NLOS

Dada la dificultad que presenta el realizar medidas bajo condiciones reales de propagación y buscando seleccionar los momentos en que se tiene visión directa (LOS, *Line-Of-Sight*) y no visión directa (NLOS, *Non-LOS*) entre el Tx y Rx, se plantea una propuesta de metodología para determinar dichos parámetros en función de tramos de cada uno de los registros obtenidos en la campaña de medidas en los que se puedan determinar condiciones LOS y NLOS. En este sentido, se propone un método de procesado de las medidas mediante el uso de registros de vídeo, para lo cual se instaló una cámara a bordo del vehículo Rx, con el propósito de seleccionar los tramos en los cuales se pueda determinar las condiciones LOS y NLOS entre el Tx y Rx.

4.2.2.5. Condiciones LOS-NLOS y análisis algoritmo de ventana deslizante

La metodología utilizada en esta propuesta para el procesado de los registros es la de fusionar los registros individuales, generados en el proceso de clasificación LOS y NLOS, (ver sección 4.2.2.4), con lo que se obtienen registros totales clasificados en LOS y NLOS para cada uno de los escenarios de propagación. El objetivo es aplicar el algoritmo de ventana deslizante, (ver sección 4.2.2.3), a los registros totales y de esta manera desarrollar otra propuesta para obtener los parámetros que caracterizan el canal de propagación.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2V

Tabla 4.1: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método fusión de registros), a 700 MHz y 5,9 GHz

Escenario	700 MHz			5,9 GHz		
	L_0 (dB)	γ	σ_S (dB)	L_0 (dB)	γ	σ_S (dB)
URBANO A-D	29,63	2,06	5,55	56,74	1,60	5,56
URBANO B-D	30,86	1,84	6,69	55,67	1,62	5,42
SUBURBANO	8,09	3,30	7,97	48,80	1,97	6,70
RURAL	11,64	3,17	3,55	54,72	1,80	5,37
AUTOVÍA	17,56	2,91	4,75	48,56	2,12	6,31

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los parámetros del modelo de pérdidas de propagación de acuerdo con los métodos propuestos.

4.3. Resultados fusión de registros

En la Fig. 4.1 se representan las pérdidas de propagación en función de la distancia de separación Tx-Rx para un entorno urbano con alta densidad de tráfico rodado, a 700 MHz y 5,9 GHz. Aplicando un ajuste lineal por mínimos cuadrados (curva azul y roja en la Fig. 4.1) se obtiene: $L_0 = 26,06$ dB, $\gamma = 2,19$ y $\sigma_S = 3,93$ dB a 700 MHz y $L_0 = 55,2$ dB, $\gamma = 1,87$ y $\sigma_S = 3,5$ dB a 5,9 GHz.

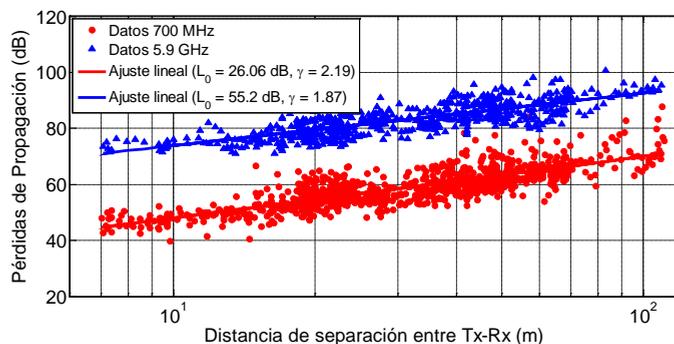


Figura 4.1: Pérdidas de propagación en función de la distancia de separación Tx-Rx, para un entorno urbano de alta densidad.

En la Tabla 4.1 se resumen los valores del modelo de pérdidas de propagación dado por Ec. 2.23 para cada entorno. En este caso los parámetros han sido derivados utilizando la fusión de todos los registros sin distinguir entre condiciones de propagación LOS y NLOS. La Tabla 4.2 muestra el rango de

4.3 Resultados fusión de registros

Tabla 4.2: Distancia de separación Tx-Rx (en metros)

Escenario	700 MHz		5,9 GHz	
	d_{min}	d_{max}	d_{min}	d_{max}
URBANO A-D	7,00	185,28	6,92	482,22
URBANO B-D	7,00	255,95	7,00	174,43
SUBURBANO	14,08	262,94	14,14	308,52
RURAL	13,05	499,00	13,00	346,50
AUTOVÍA	20,10	940,00	20,00	1475,00

distancia entre Tx-Rx para los recorridos donde se han realizado las medidas. El rango de distancias Tx-Rx medido se encuentra dentro de los valores típicos para cada entorno.

Los rangos del exponente de pérdidas de propagación oscilan desde 1,84 hasta 3,30 y desde 1,60 hasta 2,12 a 700 MHz y 5,9 GHz, respectivamente. El mayor exponente de pérdidas de propagación ocurre para el escenario suburbano a 700 MHz y el escenario de autovía a 5,9 GHz. La tendencia indica que los valores medios del exponente de pérdidas de propagación son elevados a 700 MHz, mientras los valores de L_0 son reducidos, dando lugar a menores pérdidas de propagación comparadas con las obtenidas a 5,9 GHz, como se esperaba. Con respecto al desvanecimiento a gran escala modelado por σ_S , la señal recibida sufre grandes variaciones en entornos urbanos y suburbanos a 700 MHz, mientras que a 5,9 GHz aparecen grandes fluctuaciones en entornos suburbanos y de autovía.

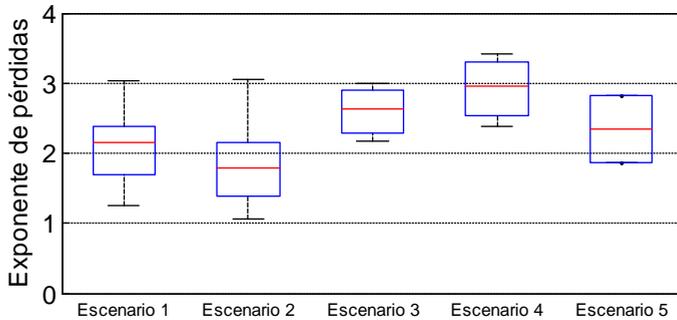


Figura 4.2: Diagrama de cajas del exponente de pérdidas de propagación para los escenarios 1, 2, 3, 4 y 5, a 700 MHz.

La dispersión del exponente de pérdidas de propagación para los escenarios urbano de alta densidad (Escenario 1), urbano de baja densidad (Escenario 2), suburbano (Escenario 3), rural (Escenario 4) y de autovía (Escenario 5)

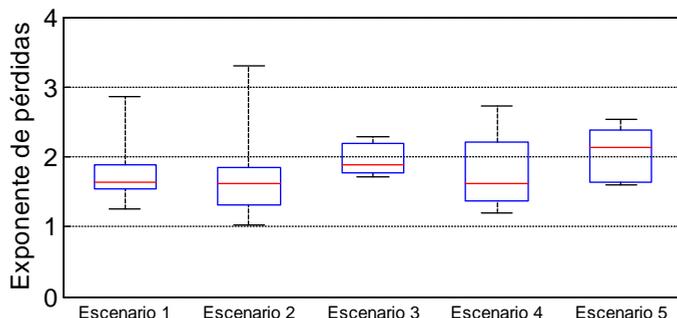


Figura 4.3: Diagrama de cajas del exponente de pérdidas de propagación para los escenarios 1, 2, 3, 4 y 5, a 5,9 GHz.

se muestra en las Fig. 4.2 y Fig. 4.3, a 700 MHz y 5,9 GHz, respectivamente. La marca central (línea roja) es el valor de la mediana, los límites inferior y superior de la caja son los percentiles 25% y 75%, respectivamente. Asimismo se ilustran los valores límites, inferior y superior entre los que se distribuye dicho exponente. En la Tabla 4.3 se resumen los resultados generados por los diagrama de cajas de las Fig. 4.2 y Fig. 4.3.

4.4. Resultados registros individuales

En la Tabla 4.4, se recogen el valor máximo, medio y mínimo de los parámetros del modelo lineal dado por Ec. 2.23. Por ejemplo, en el escenario 1 a 5,9 GHz, L_0 fluctúa entre 28,02 y 66,00 dB con valor medio de 54,45 dB, γ fluctúa entre 1,26 y 2,87 con valor medio de 1,75 y σ_S fluctúa entre 3,02 y 7,04 dB con valor medio de 4,10 dB. De igual manera, el valor medio de γ es 1,66, 1,96, 2,73 y 2,54 para los escenarios 2, 3, 4 y 5 respectivamente. A 700 MHz, el valor medio de γ es 2,08, 1,78, 2,60, 3,41 y 2,83 para los escenarios 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente.

Por otra parte, al realizar el procesado de los registros de manera individual, se ha observado un comportamiento de las pérdidas de propagación en base a un modelo a dos pendientes (ver Ec.(2.24)), para algunos de los recorridos analizados. Conviene indicar que dicho comportamiento no aparece en todos los escenarios de propagación ni en las dos bandas de frecuencia (700 MHz y 5,9 GHz) en las que se han realizado las medidas.

En las Fig. 4.4 y Fig. 4.5 se representan las pérdidas de propagación en función de la distancia de separación Tx-Rx para entornos urbano con alta densidad de tráfico rodado y de autovía, respectivamente, a 700 MHz. Se observa un comportamiento en los dos casos a doble pendiente, de manera que

4.4 Resultados registros individuales

Tabla 4.3: Parámetros estadísticos del exponente de pérdidas de propagación a 700 MHz y 5,9 GHz.

Valor	Escenario 1 (Urbano alta densidad)	
	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz
percentil 25 %	1,70	1,53
mediana	2,17	1,63
percentil 75 %	2,39	1,88
Valor	Escenario 2 (Urbano baja densidad)	
	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz
percentil 25 %	1,38	1,30
mediana	1,78	1,62
percentil 75 %	2,16	1,84
Valor	Escenario 3 (Suburbano)	
	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz
percentil 25 %	2,29	1,77
mediana	2,63	1,90
percentil 75 %	2,91	2,19
Valor	Escenario 4 (Rural)	
	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz
percentil 25 %	2,52	1,37
mediana	2,97	1,61
percentil 75 %	3,29	2,21
Valor	Escenario 5 (Autovía)	
	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz
percentil 25 %	1,86	1,62
mediana	2,34	2,14
percentil 75 %	2,83	2,38

aplicando un ajuste lineal por mínimos cuadrados (curva magenta para la primer pendiente y curva roja para la segunda pendiente en las Fig. 4.4 y Fig. 4.5) se obtiene: $L_{01} = 36,83$ dB, $\gamma_1 = 1,65$, $\sigma_{S_1} = 4,73$ dB, $\gamma_2 = 3,26$ y $\sigma_{S_2} = 5,1$, con una distancia critica denotada por dc_e igual a 39,67 m., para el entorno urbano de alta densidad y $L_{01} = 33,94$ dB, $\gamma_1 = 1,86$, $\sigma_{S_1} = 4,84$ dB, $\gamma_2 = 3,65$, $\sigma_{S_2} = 3,68$ y $dc_e = 86,33$ m., para el entorno de autovía. De igual manera, en la Fig. 4.6 se representan las pérdidas de propagación en función de la distan-

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2V

Tabla 4.4: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método registros individuales), a 700 MHz y 5,9 GHz.

Valor	Escenario 1 (Urbano alta densidad)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	3,03	39,94	5,75	2,87	66,00	7,04
Medio	2,08	28,73	4,66	1,75	54,45	4,10
Mínimo	1,25	13,33	3,42	1,26	28,02	3,02
Desviación	0,45	7,00	0,65	0,39	8,39	0,90
$\%rms$	21,38	24,35	13,85	22,30	15,41	22,06
Valor	Escenario 2 (Urbano baja densidad)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	3,05	42,72	7,25	3,30	64,43	6,04
Medio	1,78	31,76	5,83	1,66	55,79	4,45
Mínimo	1,07	16,07	4,34	1,02	31,88	3,04
Desviación	0,49	5,77	0,74	0,52	8,43	0,82
$\%rms$	27,8	18,16	12,68	31,48	15,11	18,48
Valor	Escenario 3 (Suburbano)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	3,00	26,08	6,22	2,28	52,40	7,09
Medio	2,60	19,17	5,34	1,96	48,63	6,22
Mínimo	2,18	10,24	3,97	1,72	42,25	4,80
Desviación	0,41	8,11	1,20	0,29	5,56	1,24
$\%rms$	15,77	42,31	22,54	14,62	11,43	19,94
Valor	Escenario 4 (Rural)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	3,41	25,51	4,52	2,73	66,38	6,80
Medio	2,92	16,63	3,56	1,79	55,48	5,15
Mínimo	2,39	9,48	1,97	1,20	40,65	4,31
Desviación	0,51	8,15	1,39	0,66	10,75	1,12
$\%rms$	17,51	49,01	38,96	36,80	19,37	21,76
Valor	Escenario 5 (Autovía)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	2,83	33,94	4,84	2,54	57,88	7,89
Medio	2,35	27,10	4,51	2,04	49,22	5,63
Mínimo	1,86	20,26	4,18	1,59	38,34	4,36
Desviación	0,69	9,67	0,47	0,42	8,27	1,35
$\%rms$	29,25	35,69	10,35	20,45	16,81	23,99

4.4 Resultados registros individuales

cia de separación Tx-Rx para un entorno urbano con baja densidad de tráfico rodado a 5,9 GHz, obteniendo: $L_{0_1} = 59,88$ dB, $\gamma_1 = 1,61$, $\sigma_{S_1} = 4,00$ dB, $\gamma_2 = 4,42$, $\sigma_{S_2} = 5,26$ $dc_e = 134,56$ m.

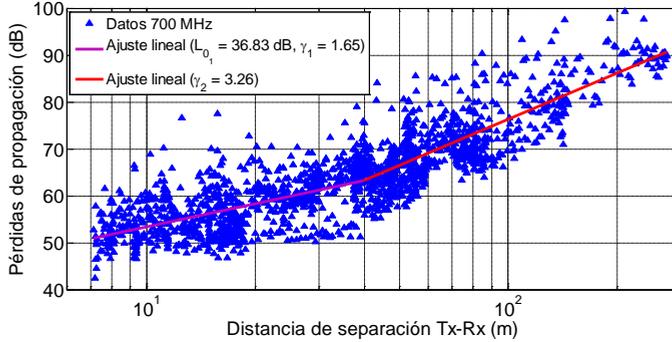


Figura 4.4: Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario urbano de alta densidad.

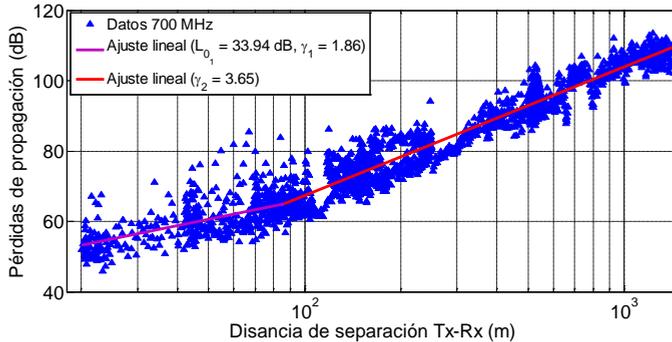


Figura 4.5: Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario de autovía.

Los parámetros que caracterizan las pérdidas de propagación para este modelo a dos pendientes se recopilan en la Tabla 4.5. Los rangos del exponente de pérdidas de propagación para la primera pendiente oscilan desde 1,04 hasta 2,13 y desde 1,72 hasta 2,46 a 700 MHz y 5,9 GHz, respectivamente. Los mayores exponentes de pérdidas de propagación para la primera pendiente aparecen en entornos urbanos de baja densidad a 700 MHz y 5,9 GHz. De igual manera, los rangos del exponente de pérdidas de propagación para la segunda pendiente oscilan desde 3,43 hasta 4,92 y desde 6,26 hasta 9,69 a 700 MHz y 5,9 GHz,

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2V

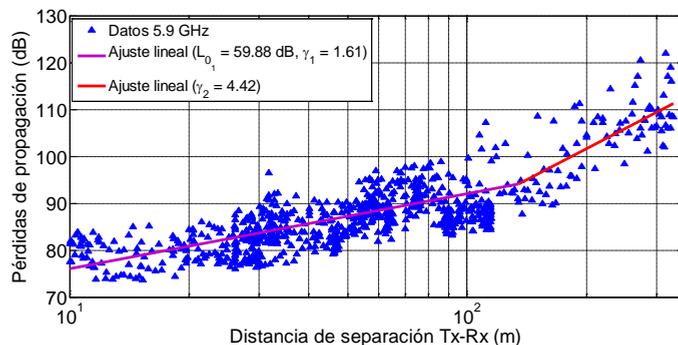


Figura 4.6: Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario urbano de baja densidad.

Tabla 4.5: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación a dos pendientes (método registros individuales), a 700 MHz y 5,9 GHz.

Escenario	700 MHz					
	L_{0_1} (dB)	γ_1	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)	dc_e (m)
URBANO A-D	37,34	1,45	4,52	3,43	5,00	35,16
URBANO B-D	31,42	2,13	5,47	3,76	6,66	35,44
SUBURBANO	38,78	1,04	4,28	4,92	5,67	58,40
AUTOVÍA	33,94	1,86	4,84	3,65	3,68	86,33
Escenario	5,9 GHz					
	L_{0_1} (dB)	γ_1	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)	dc_e (m)
URBANO B-D	45,88	2,46	4,49	6,26	5,01	132,42
SUBURBANO	52,40	1,72	4,80	9,69	5,25	306,04

respectivamente. Los mayores exponentes de pérdidas de propagación para la segunda pendiente se presentan en entornos suburbanos a 700 MHz y 5,9 GHz. Con respecto al desvanecimiento a gran escala modelado por σ_S , la señal recibida sufre las mayores variaciones en entornos urbano de baja densidad y suburbano a 700 MHz, y 5,9 GHz. Por otra parte, la distancia crítica oscila desde 35,16 m. y 86,33 m. a 700 MHz obteniendo la mayor distancia crítica en entorno de autovía, mientras que la distancia crítica a 5,9 GHz varía entre 132,42 m. y 306,04 m., para entornos urbano de baja densidad y suburbano, respectivamente.

Cabe resaltar que en nuestra campaña de medidas son muy pocos los registros y los escenarios en los que se presenta un comportamiento a dos pendientes en el análisis de las pérdidas de propagación.

4.5. Resultados algoritmo de ventana deslizante

A continuación se describe el procedimiento llevado a cabo para el análisis de los registros con el método propuesto:

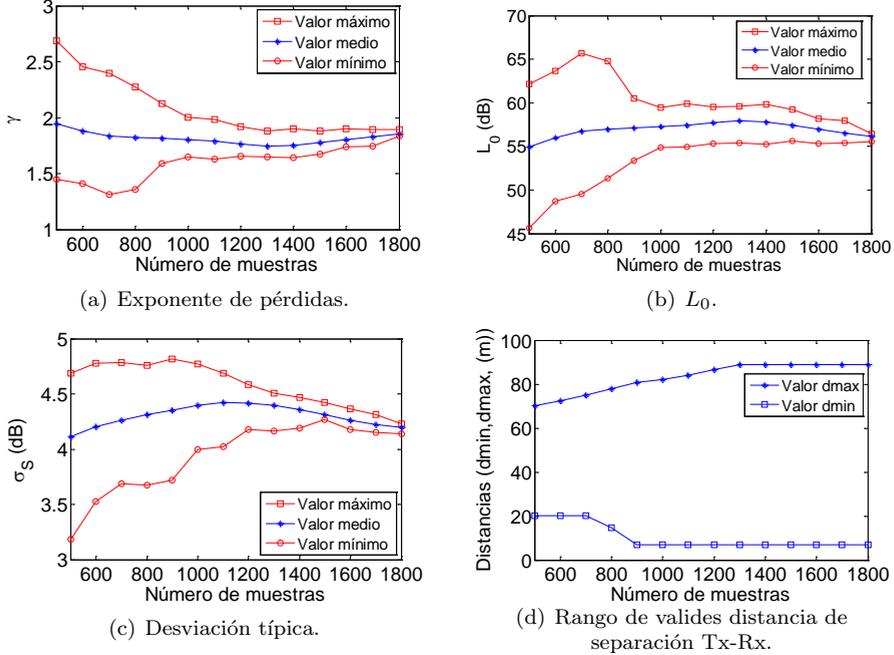


Figura 4.7: Parámetros obtenidos para diferentes tamaños de ventana.

- Tamaño de la ventana:** Para escoger el tamaño de la ventana se ha diseñado un algoritmo que efectúa un barrido sobre las muestras del registro variando el tamaño de la ventana, con lo que se obtienen los valores máximos medios y mínimos de los parámetros γ , L_0 , σ_S y distancia de separación entre Tx-Rx para cada uno de los tamaños de la ventana, los cuales se muestran en la Fig. 4.7. Luego se realiza un análisis del comportamiento de dichos parámetros y de esta manera se escoge el tamaño óptimo de ventana para el registro de datos que se esté analizando.

En las Figs. 4.7(a), 4.7(b), 4.7(c) y 4.7(d) se muestra el comportamiento de los parámetros γ , L_0 , σ_S y distancia de separación entre Tx-Rx, respectivamente, para valores de ventana que oscilan desde 500 hasta 1800, en incrementos de 100, para un registro de medidas a 5,9 GHz en un entorno urbano de alta densidad de tráfico rodado. Para este caso, el tamaño de

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2V

ventana óptima es de 900, el cual se ha escogido teniendo en cuenta el análisis del comportamiento de los parámetros mostrados en la Fig. 4.7: es decir, tratando de encontrar un equilibrio (tendencia), en los valores de γ , L_0 , σ_S y buscando obtener la máxima distancia de separación Tx-Rx (ver 4.7(d)).

- **Obtención de los parámetros:** Una vez que se ha escogido el tamaño de la ventana se procede a obtener los parámetros que caracterizan las pérdidas de propagación del canal de comunicaciones. En este caso para el ejemplo que se está analizando con un total de 1872 muestras y un tamaño de ventana de 900, al aplicar el algoritmo de ventana deslizante, se generan registros de 973 valores de γ , L_0 , σ_S , con los que se obtienen valores máximos, medios y mínimos para cada uno de dichos parámetros.

En la Tabla 4.6 se resumen los valores del modelo de pérdidas de propagación dados por la Ec. (2.23) para cada entorno. En este caso, los parámetros han sido derivados utilizando el algoritmo de ventana deslizante sin distinguir entre condiciones de propagación LOS y NLOS.

Los rangos del exponente de pérdidas de propagación oscilan entre 1,02 y 3,45 y desde 1,02 hasta 3,97 a 700 MHz y 5,9 GHz, respectivamente. El mayor exponente de pérdidas de propagación se presenta en entornos urbanos de alta densidad de tráfico rodado a 700 MHz y 5,9 GHz. La tendencia indica que los valores medios del exponente de pérdidas de propagación alcanzan valores altos a 700 MHz, mientras los valores de L_0 permanecen reducidos proporcionando menos pérdidas de propagación comparadas con 5,9 GHz, como se esperaba. Con respecto al desvanecimiento a gran escala modelado por σ_S , la señal recibida sufre grandes variaciones en entornos rurales a 700 MHz, mientras que a 5,9 GHz aparecen grandes fluctuaciones en entornos urbanos con alta densidad de tráfico y rurales.

Además de los resultados mostrados en la Tabla 4.6, es interesante analizar la dispersión de los parámetros. En este sentido, las Figs. 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 muestran el histograma del exponente de pérdidas de propagación a 700 MHz y 5,9 GHz. Con el propósito de facilitar las comparaciones, el eje de la abscisa es el mismo para los cinco escenarios. Se puede observar que los valores para el entorno rural a 5,9 GHz permanecen más concentrados en torno a un valor; es decir, existe una menor dispersión, mientras que la mayor dispersión aparece en los entornos urbano de alta densidad de tráfico, urbano de baja densidad a 700 MHz y 5,9 GHz y autovía a 5,9 GHz.

Cabe resaltar la necesidad de clasificar los registros obtenidos en la campaña de medidas bajo condiciones LOS y NLOS dada la distribución bimodal que presentan la mayoría de los resultados.

4.5 Resultados algoritmo de ventana deslizante

Tabla 4.6: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método algoritmo de ventana deslizante), a 700 MHz y 5,9 GHz.

Valor	Escenario 1 (Urbano alta densidad)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	3,45	42,55	6,17	3,97	66,16	6,79
Medio	2,03	29,25	4,53	1,96	49,29	4,40
Mínimo	1,07	7,36	3,06	1,02	6,73	2,79
Desviación	0,44	7,74	0,65	0,65	14,53	1,00
$\%rms$	21,67	26,46	14,35	33,16	29,48	22,73
Valor	Escenario 2 (Urbano baja densidad)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	3,20	43,93	8,29	3,47	69,89	6,81
Medio	1,86	30,58	5,98	1,82	51,76	4,35
Mínimo	1,02	13,35	3,42	1,03	28,53	2,79
Desviación	0,41	5,45	0,86	0,51	8,51	0,80
$\%rms$	22,04	17,82	14,38	28,02	16,44	18,39
Valor	Escenario 3 (Suburbano)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	3,20	28,72	6,63	2,75	59,29	7,47
Medio	2,44	21,62	5,69	1,96	49,03	6,53
Mínimo	1,72	5,82	3,12	1,27	32,14	4,78
Desviación	0,41	6,66	1,15	0,30	6,29	0,96
$\%rms$	16,80	30,80	20,21	15,31	12,83	14,70
Valor	Escenario 4 (Rural)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	3,27	32,43	4,58	2,95	65,80	7,80
Medio	2,67	20,14	2,71	1,57	58,24	5,30
Mínimo	2,02	9,81	1,70	1,18	38,66	3,88
Desviación	0,27	4,95	1,22	0,28	4,44	1,29
$\%rms$	10,11	24,58	45,02	17,83	7,62	24,34
Valor	Escenario 5 (Autovía)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	3,13	35,61	5,09	3,34	64,97	8,33
Medio	2,48	25,21	4,47	2,03	49,43	5,83
Mínimo	1,78	14,25	3,87	1,13	18,50	4,27
Desviación	0,52	7,68	0,47	0,60	12,84	1,09
$\%rms$	20,97	30,46	10,51	29,56	25,98	18,70

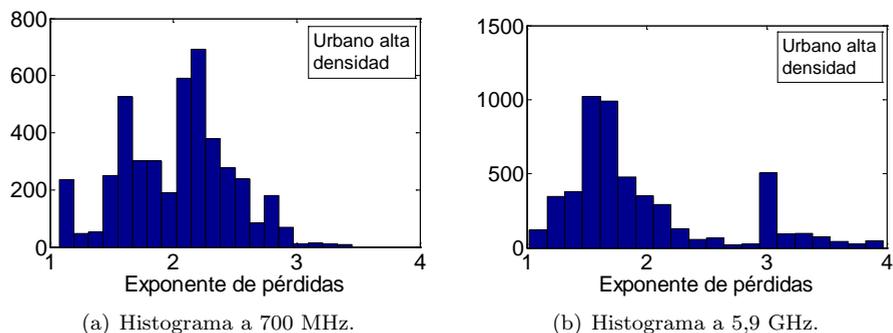


Figura 4.8: Histogramas del exponente de pérdidas para escenario urbano de alta densidad de tráfico.

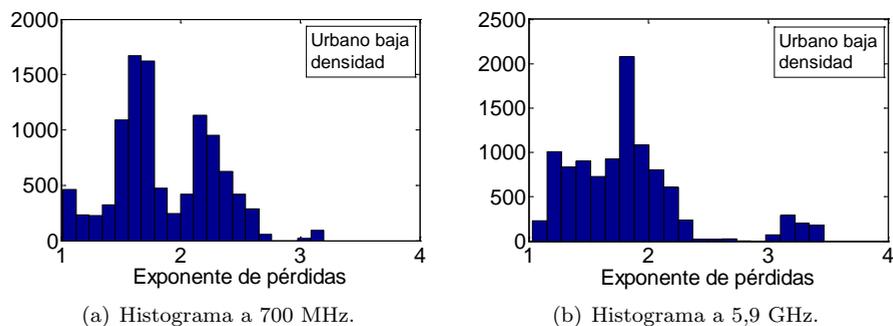


Figura 4.9: Histogramas del exponente de pérdidas para escenario urbano de baja densidad de tráfico.

4.6. Resultados condiciones LOS y NLOS

La Fig. 4.13 ilustra la vídeo cámara que se ha utilizado a bordo del vehículo Rx, con el propósito de obtener un registro de los vídeos para los recorridos donde se realizaron las medidas, y de esta manera seleccionar los tramos en los cuales existe visión directa entre el Tx y Rx y en los cuales la línea de visión directa es obstruida.

A continuación se resume la metodología implementada para el procesado de los registros obtenidos en la campaña de medidas con el método propuesto:

- **Sincronización del sistema:** se debe sincronizar el reloj de la cámara de vídeo, tomando como referencia el tiempo de inicio de cualquiera de los recorridos hechos durante el día en el cual se hace el registro del vídeo.

4.6 Resultados condiciones LOS y NLOS

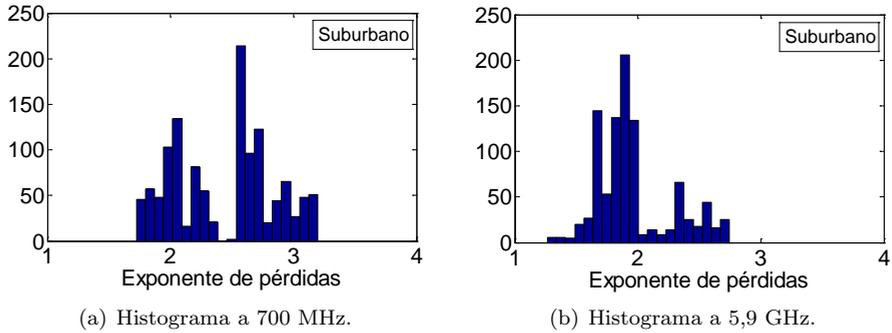


Figura 4.10: Histogramas del exponente de pérdidas para escenario suburbano.

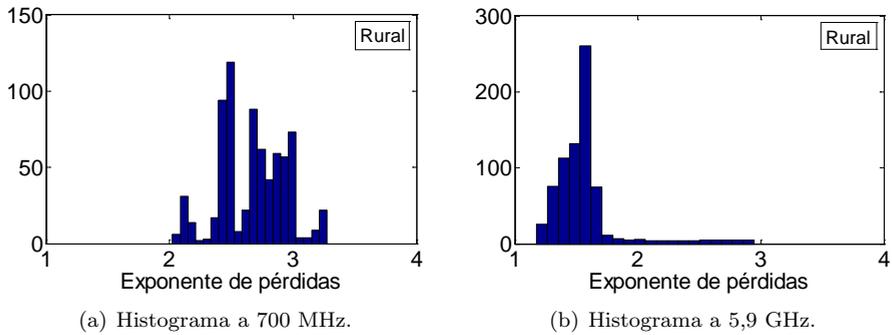


Figura 4.11: Histogramas del exponente de pérdidas para escenario rural.

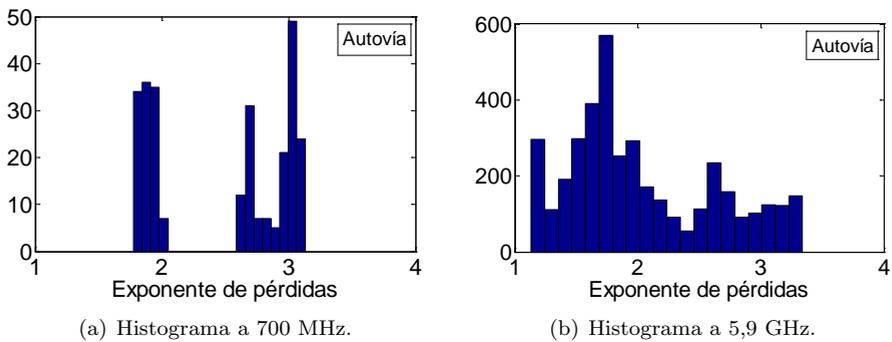


Figura 4.12: Histogramas del exponente de pérdidas para escenario de autovía.



Figura 4.13: Instalación de la cámara a bordo del vehículo Rx.

- **Selección de los tramos LOS y NLOS:** se revisa el registro del vídeo para obtener los tiempos en que existe LOS y NLOS y de esta manera poder relacionar estos tiempos con los tiempos obtenidos para las trazas de las medidas. Lo cual nos permite seleccionar los tramos LOS y NLOS para cada uno de los registros medidos.
- **Análisis y generación de resultados:** se calculan las pérdidas de propagación y se obtienen los parámetros que caracterizan el canal de comunicaciones V2V en banda estrecha, para cada uno de los tramos LOS y NLOS. También se obtienen, a modo de comparación, los parámetros para cada los registros totales clasificados en función del escenario de propagación y de las condiciones LOS y NLOS.

En [58], [59] se han presentado algunos resultados preliminares de los valores obtenidos del modelo de pérdidas de propagación para escenarios urbano de alta densidad, urbano de baja densidad y de autovía a 700 MHz y 5,9 GHz, clasificándolos bajo condiciones LOS y NLOS. Los resultados muestran una clara diferencia entre condiciones LOS y NLOS, en los parámetros del modelo de propagación, los cuales se encuentran relacionados con el entorno de propagación. Es importante resaltar que muy pocas publicaciones han tenido en cuenta de manera exhaustiva la clasificación entre condiciones LOS y NLOS al presentar sus resultados. Asimismo, el rendimiento final de las aplicaciones vehiculares puede ser influenciado por esas condiciones de propagación; además se hace necesaria una caracterización de dichas condiciones. En este sentido, se proporcionan unos resultados útiles en la caracterización de las pérdidas de propagación, los cuales pueden ser utilizados para simular y diseñar las furas redes vehiculares bajo condiciones mas reales de propagación.

4.6 Resultados condiciones LOS y NLOS

Como se ha comentado anteriormente, diferentes trabajos relacionados con medidas experimentales del canal vehicular han establecido una relación lineal entre las pérdidas de propagación y la distancia de separación entre el Tx-Rx [6], [29], [60]. El modelo de pérdidas de propagación propuesto por los autores es muy preciso, adecuado y fácil de integrar en los simuladores VANETS.

Sin embargo, dado que los parámetros del modelo de la Ec. (2.23) se han derivado a partir de los datos medidos, es más conveniente escribir dicha ecuación de la forma

$$L(d) = L_0 + 10\gamma \log_{10} d + S, \quad d_{min} \leq d \leq d_{max}. \quad (4.1)$$

Así, los parámetros del modelo pueden derivarse utilizando el método de ajuste lineal por mínimos cuadrados, los cuales son validos únicamente para el rango de distancias entre Tx-Rx de los datos medidos, donde d_{min} y d_{max} corresponden a la distancia de separación Tx-Rx mínima y máxima, respectivamente.

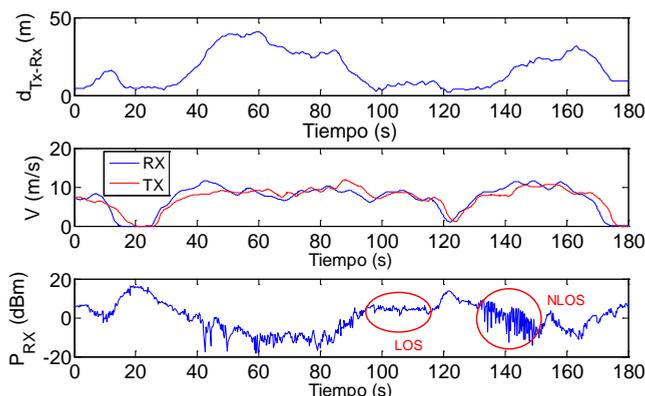


Figura 4.14: Distancia de separación Tx-Rx, velocidad de los vehículos y nivel de potencia medido sobre el tiempo.

La Fig. 4.14 muestra la evolución de la distancia de separación, la velocidad de los vehículos y el nivel de potencia medido sobre un registro de 180 s. En la figura hemos seleccionado con círculos dos *subpaths* que corresponden con condiciones LOS y NLOS, mostrando en este caso particular que la profundidad del desvanecimiento puede ser más alta en NLOS. Asimismo, conviene resaltar que las variaciones de la señal recibida están relacionadas con el entorno y el efecto de bloqueo de los vehículos que se encuentren entre Tx-Rx.

En las Fig. 4.15 y Fig. 4.16 se muestra la dispersión de las pérdidas de propagación en función de la distancia de separación entre Tx-Rx, para dos

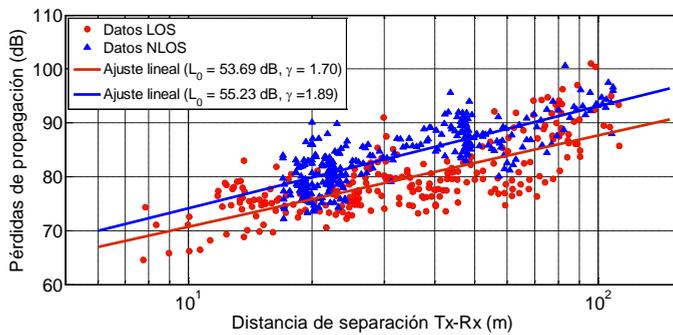


Figura 4.15: Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario urbano de alta densidad.

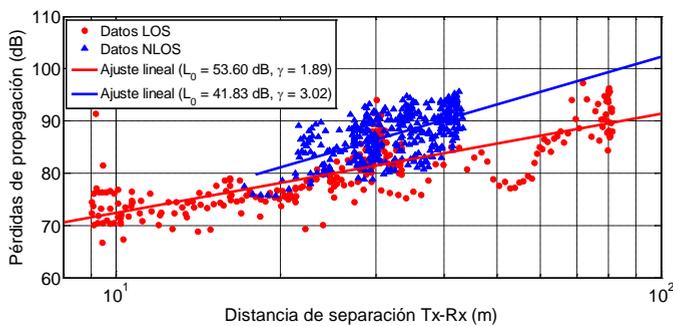


Figura 4.16: Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario urbano de alta densidad.

subpaths medidos en un entorno urbano con alta densidad de tráfico rodado, los datos medidos en LOS (rojo) y los datos medidos en NLOS (azul). Las líneas continuas corresponden con el ajuste lineal. Los resultados para el ajuste lineal ilustrado en la Fig. 4.15, muestran que la diferencia de las pérdidas de propagación entre NLOS y LOS es cerca de 6 dB para una distancia de separación entre Tx-Rx de 100 m. En la Fig. 4.16 se comprueba que no siempre las condiciones NLOS son debidas a que exista una mayor distancia de separación entre Tx-Rx.

Asimismo, en las Fig. 4.17 y Fig. 4.18 se muestran, a manera de ejemplo, la dispersión de las pérdidas de propagación en función de la distancia de separación entre Tx-Rx para dos *subpaths*: un *subpath* en LOS y otro para el caso NLOS, en entornos urbano de baja densidad y autovía.

4.6 Resultados condiciones LOS y NLOS

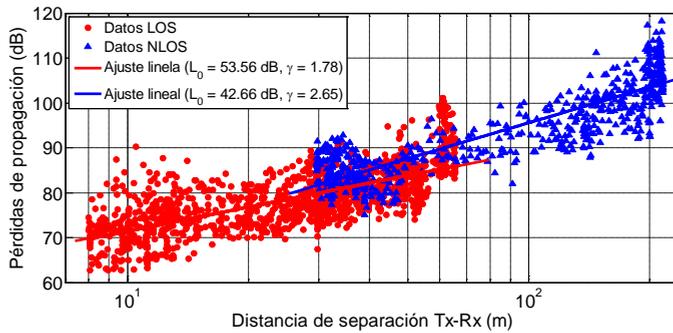


Figura 4.17: Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario urbano de baja densidad.

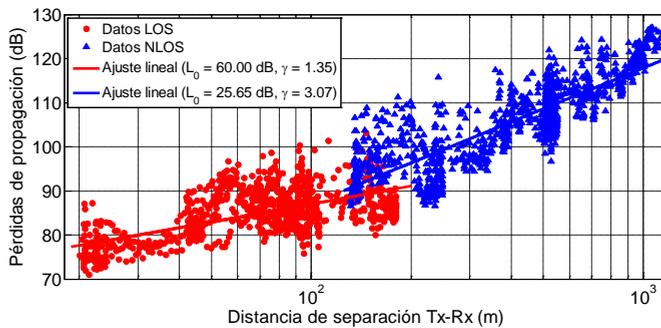


Figura 4.18: Dispersión de las pérdidas de propagación en escenario de autovía.

Se aprecia claramente la necesidad de clasificar los recorridos en base a las condiciones de propagación LOS y NLOS, dadas las diferencias presentadas en el exponente de pérdidas de propagación.

En la Tabla 4.7 se resumen los valores medios del modelo de pérdidas de propagación dado por Ec. 4.1 para cada entorno. En este caso los parámetros han sido derivados a partir del ajuste lineal de todas las medidas sin distinguir entre condiciones de propagación LOS y NLOS. La Tabla 4.8 muestra el rango de distancia entre Tx-Rx para los recorridos donde se han realizado las medidas. En la Tabla 4.8, d_{media} hace referencia a la distancia entre Tx-Rx media. El rango de distancias Tx-Rx medido se encuentra dentro de los valores típicos para cada entorno.

Los rangos del exponente de pérdidas de propagación oscilan entre 1,82 hasta 2,93 y desde 1,63 hasta 2,17 a 700 MHz y 5,9 GHz, respectivamente. El

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2V

Tabla 4.7: Parámetros medios del modelo de pérdidas de propagación (método cámara de video), a 700 MHz y 5,9 GHz

Escenario	700 MHz			5,9 GHz		
	L_0 (dB)	γ	σ_S (dB)	L_0 (dB)	γ	σ_S (dB)
URBANO A-D	36,68	2,01	6,26	58,81	1,83	4,48
URBANO B-D	38,33	1,82	6,85	59,37	1,75	5,45
SUBURBANO	41,88	2,07	6,71	49,53	2,17	6,39
RURAL	36,37	2,17	4,54	61,80	1,63	5,25
AUTOVÍA	23,57	2,93	4,87	54,96	1,95	5,21

Tabla 4.8: Distancia de separación Tx-Rx (en metros).

Escenario	LOS			NLOS		
	d_{min}	d_{media}	d_{max}	d_{min}	d_{media}	d_{max}
URBANO A-D	7,54	54,31	112,47	14,03	98,06	316,27
URBANO B-D	7,97	51,84	106,80	29,66	132,31	216,01
SUBURBANO	14,34	92,99	99,62	44,03	138,80	308,52
RURAL	13,05	51,07	94,72	45,52	88,40	131,65
AUTOVÍA	23,02	106,44	162,74	54,52	439,74	1259,10

mayor exponente de pérdidas de propagación aparece en entornos de autovía a 700 MHz, mientras que valores altos han sido derivados en entornos suburbanos y de autovía a 5,9 GHz. La tendencia indica que a 700 MHz los valores del exponente de pérdidas de propagación son elevados, mientras los valores de L_0 son reducidos, dando lugar a menores pérdidas de propagación comparadas con las obtenidas a 5,9 GHz, como se esperaba. Con respecto al desvanecimiento a gran escala modelado por σ_S , la señal recibida sufre grandes variaciones en entornos urbanos y suburbanos a 700 MHz, mientras que a 5,9 GHz aparecen pequeñas fluctuaciones en entornos urbanos con alta densidad de tráfico.

La Tabla 4.9 resume el valor de los parámetros del modelo de pérdidas de propagación para todos los *subpaths* bajo condiciones LOS y NLOS. Se han calculado valores máximos, medios y mínimos para todos los parámetros del modelos de pérdidas de propagación. Asimismo, en la Tabla 4.9 se presentan los valores del *root-mean-square* en porcentaje, simbolizados por $\%rms$, como una medida de dispersión de los parámetros. También es importante resaltar que el valor del exponente de pérdidas de propagación de la Tabla 4.7 se encuentra entre los valores medios de la Tabla 4.9 en todos los entornos y estas diferencias sugieren tener en cuenta las condiciones de propagación, es decir LOS y NLOS, para una mejor descripción del comportamiento de las pérdidas de propagación. Es necesario precisar que el exponente de pérdidas de propagación

4.6 Resultados condiciones LOS y NLOS

Tabla 4.9: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método cámara de vídeo), a 700 MHz y 5,9 GHz.

Escenario		700 MHz						5.9 GHz					
		LOS			NLOS			LOS			NLOS		
		L_0 (dB)	γ	σ_S (dB)									
URBANO A-D	Max	43,52	3,11	9,28	52,04	3,53	5,94	66,60	2,59	7,99	66,42	3,55	6,47
	Media	33,26	1,65	4,57	30,15	2,21	4,39	53,57	1,77	3,36	48,90	2,18	3,65
	Min	16,14	1,06	2,35	7,69	1,22	3,14	41,18	1,09	1,17	20,50	1,24	1,86
	%rms	19,02	25,91	36,65	39,72	30,73	17,92	11,23	21,58	32,94	24,05	27,89	31,60
URBANO B-D	Max	40,88	2,19	9,68	44,35	2,85	9,23	63,40	2,92	6,75	66,33	3,59	6,81
	Media	34,55	1,54	4,71	28,95	2,25	5,99	54,82	1,67	4,05	54,55	1,90	4,74
	Min	23,45	1,05	2,86	17,80	1,28	4,12	35,24	1,20	1,69	38,44	1,16	2,70
	%rms	11,93	21,78	33,76	30,35	24,41	24,87	10,81	26,21	25,63	14,76	31,93	24,04
SUBURBANO	Max	42,40	2,31	6,42	44,82	2,89	6,23	52,12	2,01	4,29	62,84	3,42	8,06
	Media	37,38	1,80	5,19	33,55	2,39	4,93	47,53	1,76	3,44	46,69	2,25	5,20
	Min	30,06	1,36	3,42	19,47	2,01	3,29	42,87	1,41	2,68	21,92	1,52	3,48
	%rms	17,34	26,61	30,22	31,28	15,53	21,80	8,80	13,81	18,76	30,88	29,16	30,69
RURAL	Max	34,87	2,25	3,94	29,24	2,71	3,04	62,46	2,10	5,49	66,02	2,31	5,23
	Media	29,83	2,04	2,48	26,39	2,34	2,19	57,46	1,61	4,15	55,20	1,81	4,63
	Min	25,10	1,80	1,84	19,25	2,21	1,59	50,45	1,39	3,56	46,35	1,29	3,11
	%rms	11,91	10,15	36,36	18,13	10,55	28,83	5,91	13,27	14,86	14,17	24,05	19,44
AUTOVÍA	Max	42,40	2,09	5,22	26,77	3,23	4,31	60,00	2,02	4,43	52,48	2,96	8,61
	Media	37,92	1,64	4,46	17,33	2,98	3,63	54,02	1,66	3,68	39,39	2,53	5,94
	Min	30,41	1,37	3,78	12,36	2,59	2,85	50,19	1,35	2,77	32,32	2,01	4,32
	%rms	13,85	19,31	13,69	31,81	7,88	19,90	7,59	15,34	18,65	18,95	13,39	28,79

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2V

tiene un impacto importante sobre el área de cobertura y las características de interferencia en el desarrollo de los sistemas inalámbricos. En ambas bandas de frecuencia, los valores del exponente de pérdidas son mas elevados en condiciones NLOS, con altos $\%rms$ en escenarios urbano y suburbano.

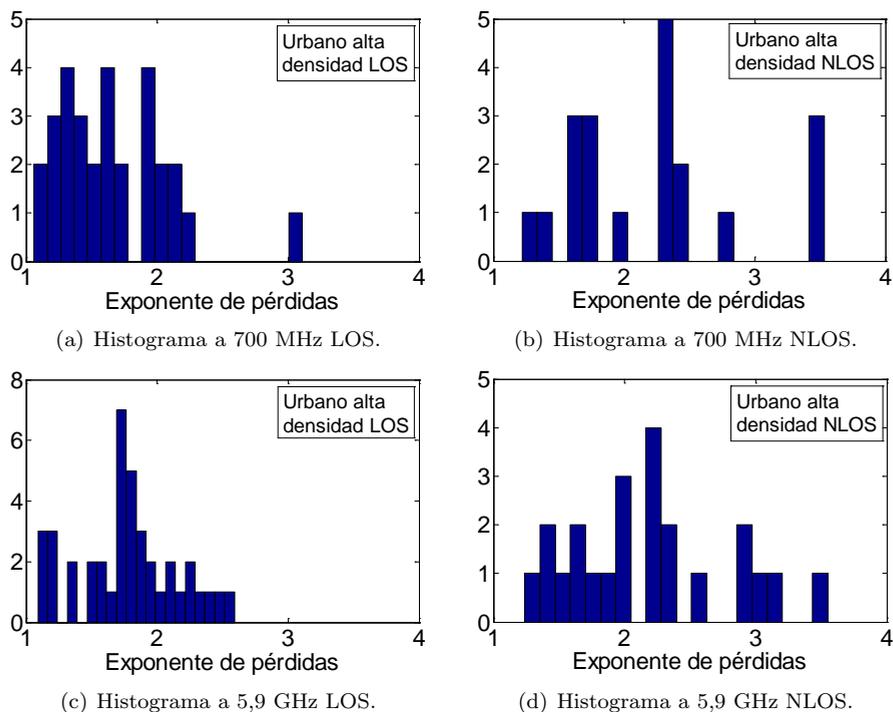


Figura 4.19: Histogramas del exponente de pérdidas para escenario urbano de alta densidad de tráfico, bajo condiciones LOS-NLOS.

Los rangos de valores del exponente de pérdidas de propagación medio a 700 MHz bajo condiciones LOS oscilan desde 1,54 hasta 2,04, y desde 2,21 hasta 2,98 en condiciones NLOS. De igual manera, los rangos de valores del exponente de pérdidas de propagación medio fluctúan desde 1,61 hasta 1,77 en LOS y desde 1,81 hasta 2,53 en NLOS. El exponente de pérdidas de propagación sufre una alta dispersión en escenarios urbano y suburbano. El parámetro L_0 es también influenciado por las condiciones de propagación, mostrando una alta variación a 700 MHz e condiciones NLOS de acuerdo con los valores de $\%rms$. Las grandes diferencias entre LOS y NLOS del parámetro L_0 aparecen en escenario de autovía, cerca de 21 y 15 dB a 700 MHz y 5,9 GHz, respectiva-

4.6 Resultados condiciones LOS y NLOS

mente. Esto es debido a la presencia de furgonetas y grandes camiones en este entorno.

Es importante resaltar que altos valores del exponente de pérdidas de propagación corresponden con bajos L_0 . Estas relaciones entre L_0 y el exponente de pérdidas de propagación también fueron observadas en [60], [61]. Existen dos posibles explicaciones: la primera es que el termino L_0 es influenciado por el termino $10\gamma \log_{10} d_0$ dado en las Ec. 2.23 y Ec. 4.1, y la segunda es que los parámetros del modelo han sido derivados por un ajuste lineal.

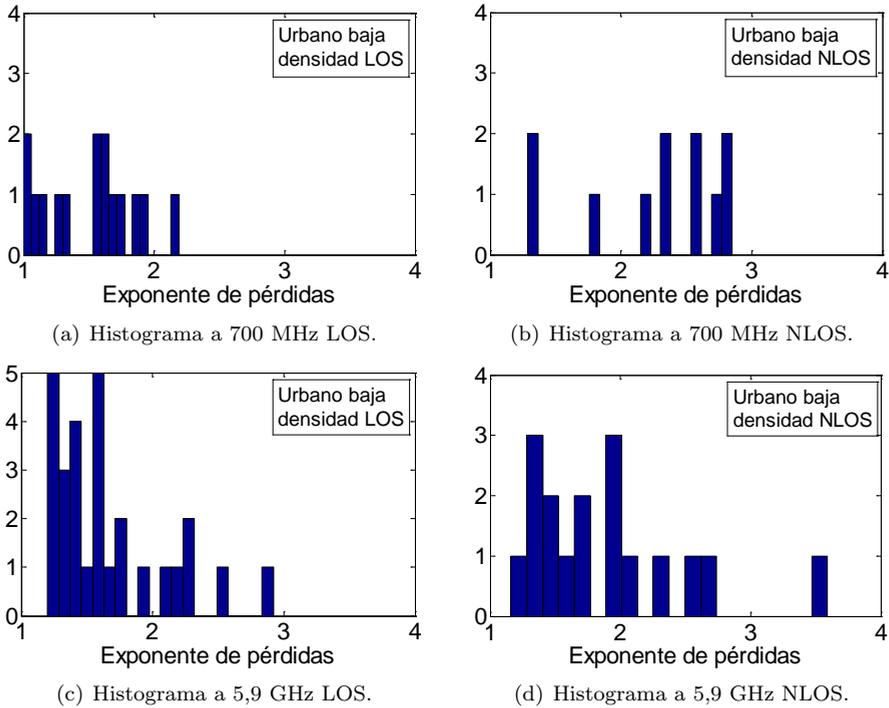
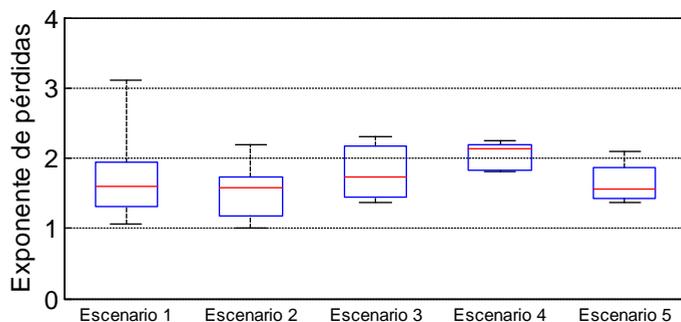


Figura 4.20: Histogramas del exponente de pérdidas para escenario urbano de baja densidad de tráfico, bajo condiciones LOS-NLOS.

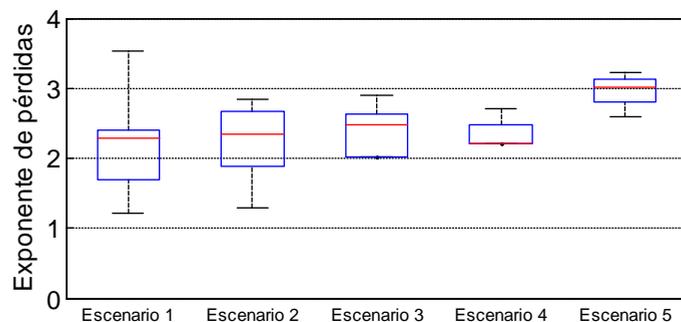
A manera de ejemplo en las Figs. 4.19 y 4.20 se muestran los histogramas del exponente de pérdidas de propagación a 700 MHz y 5,9 GHz para los escenarios urbano de alta y baja densidad de tráfico rodado, con el propósito de ilustrar la dispersión de los parámetros recopilados en la Tabla 4.9. Se puede observar una menor dispersión en los valores para ambos entornos bajo condiciones LOS a 700 MHz y 5,9 GHz, mientras que la mayor dispersión y los mayores valores

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2V

del exponente de pérdidas de propagación aparecen bajo condiciones NLOS, como era de esperar.



(a) Diagrama de cajas a 700 MHz LOS.

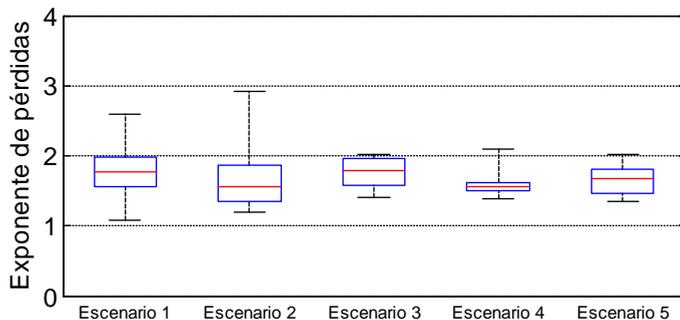


(b) Diagrama de cajas a 700 MHz NLOS.

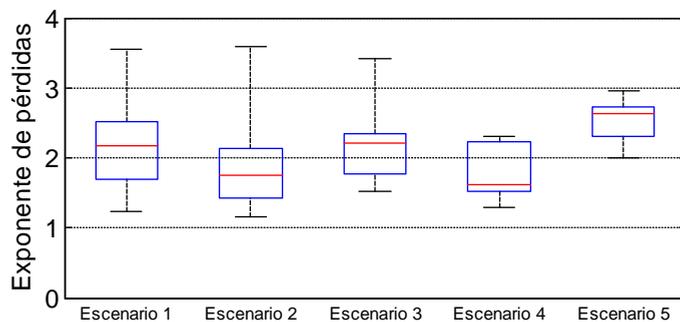
Figura 4.21: Diagrama de cajas del exponente de pérdidas de propagación para los escenarios 1, 2, 3, 4 y 5, a 700 MHz, bajo condiciones LOS y NLOS.

La dispersión del exponente de pérdidas de propagación para los cinco escenarios se muestra en las Fig. 4.21 y Fig. 4.22, a 700 MHz y 5,9 GHz, respectivamente, clasificado bajo condiciones de propagación LOS y NLOS. La marca central (línea roja) es el valor de la mediana, los límites inferior y superior de la caja son los percentiles 25% y 75%, respectivamente. Asimismo se ilustran los valores límites, inferior y superior entre los que se distribuye dicho exponente. Cabe hacer notar que el percentil 25% y la mediana y percentil 25% de los escenarios 3 y 4, respectivamente, de la Fig. 4.21(b) se sobreponen con los valores mínimos debido a la escala del eje de ordenada. En la Tabla 4.10 se resumen los resultados generados por los diagrama de cajas de las Fig. 4.21 y Fig. 4.22.

4.7 Resultados condiciones LOS-NLOS y análisis algoritmo de ventana deslizante



(a) Diagrama de cajas a 5,9 GHz LOS.



(b) Diagrama de cajas a 5,9 GHz NLOS.

Figura 4.22: Diagrama de cajas del exponente de pérdidas de propagación para los escenarios 1, 2, 3, 4 y 5, a 5,9 GHz, bajo condiciones LOS y NLOS.

4.7. Resultados condiciones LOS-NLOS y análisis algoritmo de ventana deslizante

Esta sección tiene como propósito presentar los resultados de los parámetros de caracterización del canal de propagación al fusionar los registros individuales obtenidos en la sección 4.6, generando un registro de medidas total para condiciones de propagación LOS y NLOS en cada uno de los entornos analizados.

La Tabla 4.11 resume el valor de los parámetros del modelo de pérdidas de propagación para todos los escenarios de propagación. Los valores máximos, medios y mínimos para todos los parámetros del modelos de pérdidas de propagación se recopilan en la Tablas 4.12 y 4.13, a 700 MHz y 5,9 GHz respectivamente.

En las Figs. 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 y 4.27 se muestran los histogramas del exponente de pérdidas de propagación para los escenarios urbano de alta y

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2V

Tabla 4.10: Parámetros estadísticos del exponente de pérdidas de propagación a 700 MHz y 5,9 GHz, bajo condiciones LOS y NLOS.

Valor	Escenario 1 (Urbano alta densidad)			
	LOS		NLOS	
	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz
percentil 25 %	1,33	1,57	1,69	1,70
mediana	1,62	1,76	2,28	2,17
percentil 75 %	1,94	1,99	2,40	2,52
Valor	Escenario 2 (Urbano baja densidad)			
	LOS		NLOS	
	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz
percentil 25 %	1,19	1,36	1,88	1,43
mediana	1,58	1,55	2,35	1,76
percentil 75 %	1,73	1,86	2,68	2,14
Valor	Escenario 3 (Suburbano)			
	LOS		NLOS	
	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz
percentil 25 %	1,45	1,58	2,03	1,77
mediana	1,73	1,79	2,47	2,20
percentil 75 %	2,16	1,97	2,63	2,35
Valor	Escenario 4 (Rural)			
	LOS		NLOS	
	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz
percentil 25 %	1,83	1,50	2,21	1,52
mediana	2,15	1,57	2,22	1,62
percentil 75 %	2,20	1,62	2,47	2,23
Valor	Escenario 5 (Autovía)			
	LOS		NLOS	
	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz	Frecuencia 700 MHz	Frecuencia 5,9 GHz
percentil 25 %	1,42	1,46	2,80	2,30
mediana	1,55	1,68	3,02	2,63
percentil 75 %	1,85	1,81	3,13	2,72

4.7 Resultados condiciones LOS-NLOS y análisis algoritmo de ventana deslizante

Tabla 4.11: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método fusión de registros LOS y NLOS), a 700 MHz y 5,9 GHz.

Escenario	700 MHz						5.9 GHz					
	LOS			NLOS			LOS			NLOS		
	L_0 (dB)	γ	σ_S (dB)									
URBANO A-D	32,30	1,74	5,33	14,10	3,20	6,28	53,50	1,75	5,22	61,70	1,49	5,44
URBANO B-D	32,51	1,71	5,54	9,31	3,23	7,21	55,17	1,61	5,68	56,37	1,73	7,07
SUBURBANO	29,40	2,20	6,24	24,90	2,76	5,90	42,04	2,13	4,29	48,40	2,13	5,97
Rural	21,28	2,59	3,35	29,51	2,18	1,99	55,24	1,71	4,30	53,56	1,91	4,90
AUTOVÍA	31,03	2,04	4,61	9,34	3,28	4,07	59,43	1,38	4,09	40,83	2,50	6,54

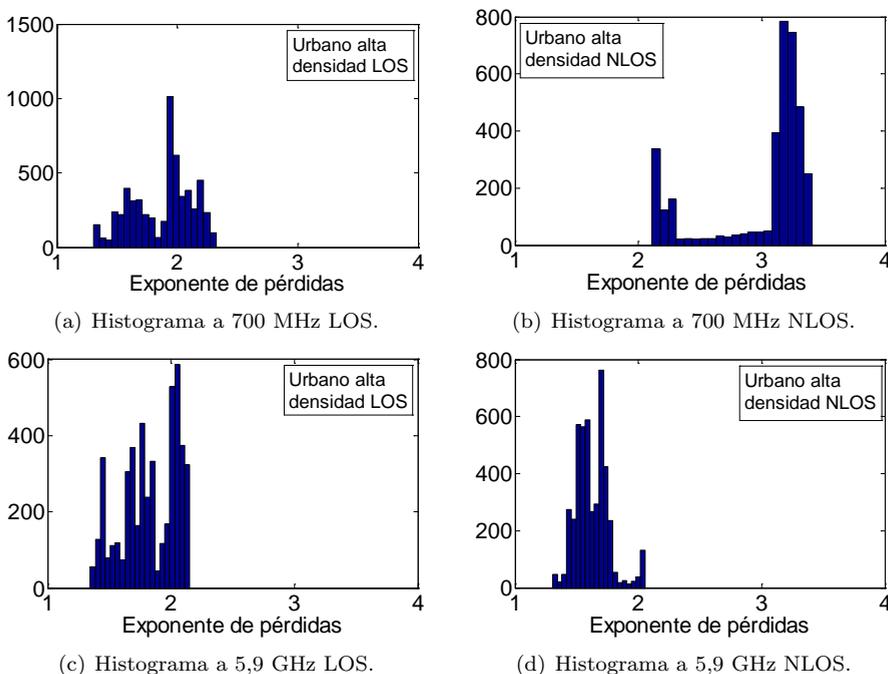


Figura 4.23: Histogramas del exponente de pérdidas para escenario urbano de alta densidad de tráfico, bajo condiciones LOS-NLOS.

baja densidad de tráfico, suburbano, rural y de autovía tanto a 700 MHz como a 5,9 GHz. Se puede observar como a 700 MHz se constata una clara diferencia en la dispersión del exponente de pérdidas, dando como resultado

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2V

Tabla 4.12: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método algoritmo de ventana deslizante en condiciones LOS y NLOS), a 700 MHz.

Valor	Escenario 1 (Urbano alta densidad)					
	LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	2,32	38,43	6,43	3,41	29,94	7,16
Medio	1,88	30,19	5,26	3,01	17,04	6,15
Mínimo	1,30	23,27	4,31	2,11	8,58	4,75
Desviación	0,25	4,45	0,62	0,41	5,85	0,75
$\%rms$	13,30	14,74	11,79	13,62	34,33	12,20
Valor	Escenario 2 (Urbano baja densidad)					
	LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	1,88	36,76	6,76	3,43	10,36	7,67
Medio	1,61	33,16	5,17	3,26	8,48	7,50
Mínimo	1,30	29,07	4,40	3,16	5,73	7,15
Desviación	0,16	2,27	0,74	0,07	1,18	0,17
$\%rms$	9,94	6,85	14,31	2,15	13,92	2,27
Valor	Escenario 3 (Suburbano)					
	LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	2,52	31,24	6,68	2,84	46,26	6,27
Medio	2,26	27,98	6,54	2,28	34,09	6,11
Mínimo	2,06	23,53	6,34	1,66	23,10	5,83
Desviación	0,17	2,93	0,12	0,45	9,00	0,08
$\%rms$	7,52	10,47	1,83	19,74	26,40	1,31
Valor	Escenario 4 (Rural)					
	LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	2,64	29,45	4,08	2,71	35,99	2,09
Medio	2,43	24,12	3,20	2,46	24,09	1,75
Mínimo	2,17	19,97	2,00	1,85	19,26	1,67
Desviación	0,12	2,49	0,55	0,22	4,30	0,07
$\%rms$	4,94	10,32	17,19	8,94	17,85	4,00
Valor	Escenario 5 (Autovía)					
	LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	2,09	37,13	4,95	3,58	9,76	4,09
Medio	1,85	34,16	4,76	3,43	5,08	4,00
Mínimo	1,68	30,09	4,50	3,26	0,76	3,86
Desviación	0,09	1,51	0,11	0,09	2,38	0,06
$\%rms$	4,86	4,42	2,31	2,62	46,85	1,50

4.7 Resultados condiciones LOS-NLOS y análisis algoritmo de ventana deslizante

Tabla 4.13: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación (método algoritmo de ventana deslizante en condiciones LOS y NLOS), a 5,9 GHz.

Valor	Escenario 1 (Urbano alta densidad)					
	LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	2,15	57,64	6,13	2,06	66,29	6,00
Medio	1,83	53,15	4,64	1,63	59,74	5,12
Mínimo	1,35	49,26	3,85	1,31	54,42	3,64
Desviación	0,22	2,44	0,76	0,14	2,56	0,57
$\%rms$	12,02	4,59	16,38	8,59	4,29	11,13
Valor	Escenario 2 (Urbano baja densidad)					
	LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	2,12	63,36	8,89	2,70	59,70	7,43
Medio	1,62	54,91	5,42	2,10	49,98	6,53
Mínimo	1,02	47,01	3,80	1,51	40,96	5,34
Desviación	0,29	4,12	1,55	0,44	6,71	0,73
$\%rms$	17,90	7,50	28,60	20,95	13,43	11,18
Valor	Escenario 3 (Suburbano)					
	LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	2,33	45,40	4,49	2,28	59,64	6,34
Medio	2,05	42,89	3,86	1,91	54,12	4,74
Mínimo	1,89	39,24	3,44	1,70	45,93	3,97
Desviación	0,15	1,73	0,32	0,14	3,54	0,58
$\%rms$	7,32	4,03	8,29	7,33	6,54	12,24
Valor	Escenario 4 (Rural)					
	LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	1,93	55,68	4,66	2,34	62,71	5,38
Medio	1,84	53,30	4,49	1,86	54,57	4,96
Mínimo	1,68	52,02	4,02	1,44	44,93	4,64
Desviación	0,06	0,91	0,16	0,26	5,13	0,29
$\%rms$	3,26	1,71	3,56	13,98	9,40	5,87
Valor	Escenario 5 (Autovía)					
	LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
Máximo	1,62	64,16	4,51	2,74	44,48	7,34
Medio	1,32	60,92	4,26	2,52	40,35	6,42
Mínimo	1,15	55,59	3,96	2,34	33,67	5,09
Desviación	0,10	1,91	0,16	0,08	2,25	0,83
$\%rms$	7,58	3,14	3,76	3,17	5,58	12,93

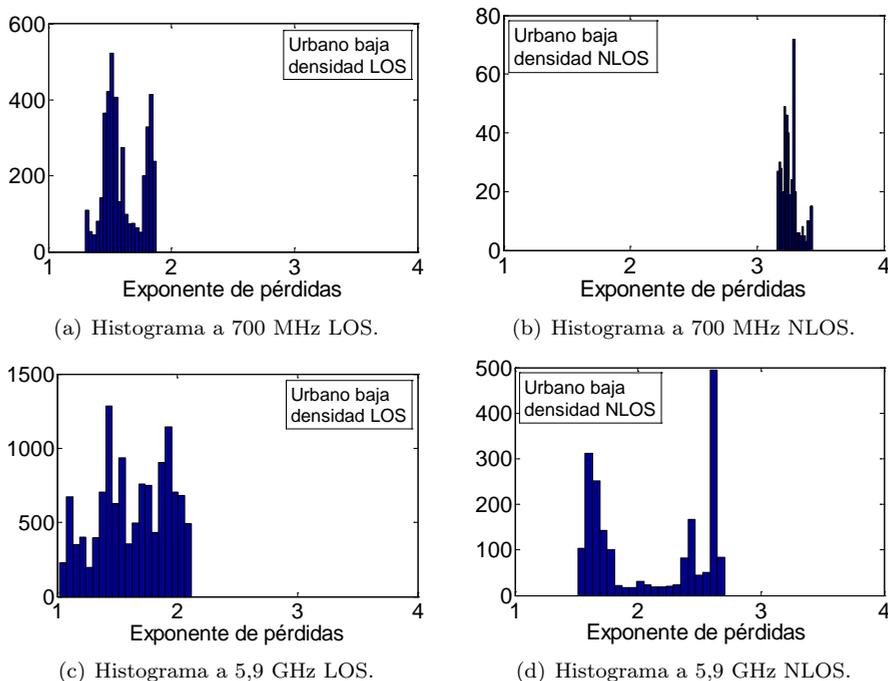


Figura 4.24: Histogramas del exponente de pérdidas para escenario urbano de baja densidad de tráfico, bajo condiciones LOS-NLOS.

mayores valores del dicho exponente bajo condiciones de propagación NLOS, lo cual era de esperar. Sin embargo, no sucede lo mismo para algunos casos a 5,9 GHz en los que no se tiene la misma tendencia, tal como se ilustra en las Figs 4.23(c), 4.23(d) 4.25(c) y 4.25(d). En dichas figuras se muestra el comportamiento del exponente de pérdidas de propagación, cuyos valores medios oscilan entre 1,83 y 2,05 bajo condiciones LOS y entre 1,63 y 1,91 bajo condiciones NLOS, para los escenarios urbano de alta densidad y suburbano, respectivamente.

4.8. Análisis de resultados

En esta sección se realiza un análisis de los parámetros del modelo de pérdidas de propagación para la caracterización experimental del canal V2V de acuerdo con el modelo dado por la Ec. (2.23), teniendo en cuenta los resultados obtenidos al aplicar los métodos de análisis propuestos en este trabajo; es decir,

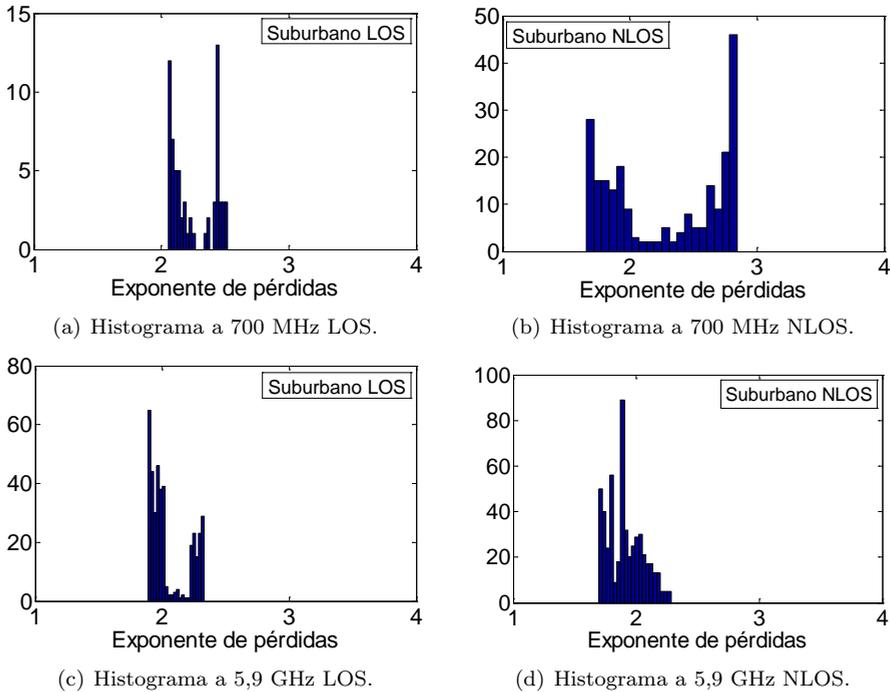


Figura 4.25: Histogramas del exponente de pérdidas para escenario suburbano, bajo condiciones LOS-NLOS.

fusión de registros, registros individuales y algoritmo de ventana deslizante representados por FR, RI y AVD, respectivamente. Los cuales también han sido aplicados para el caso de la clasificación de los registros bajo condiciones de propagación LOS y NLOS.

En la Tabla 4.14 se han recopilado los valores medios obtenidos para cada parámetro de acuerdo con los métodos de análisis.

Los rangos del exponente de pérdidas de propagación para cada uno de los escenarios oscilan: i) urbano de alta densidad, desde 2,03 hasta 2,08 a 700 MHz y desde 1,60 hasta 1,96 a 5,9 GHz, ii) urbano de baja densidad, desde 1,78 hasta 1,86 a 700 MHz y desde 1,62 hasta 1,82 a 5,9 GHz, iii) suburbano, desde 2,44 hasta 3,30 a 700 MHz y desde 1,96 hasta 1,97 a 5,9 GHz, iv) rural, desde 2,67 hasta 3,17 a 700 MHz y desde 1,57 hasta 1,80 a 5,9 GHz y v) autovía, desde 2,35 hasta 2,91 a 700 MHz y desde 2,03 hasta 2,12 a 5,9 GHz.

Tomando como referencia los valores medios de los parámetros obtenidos en cada uno de los métodos de análisis se observa que el exponente de pérdidas de propagación es mayor a 700 MHz que a 5,9 GHz para todos los escenarios

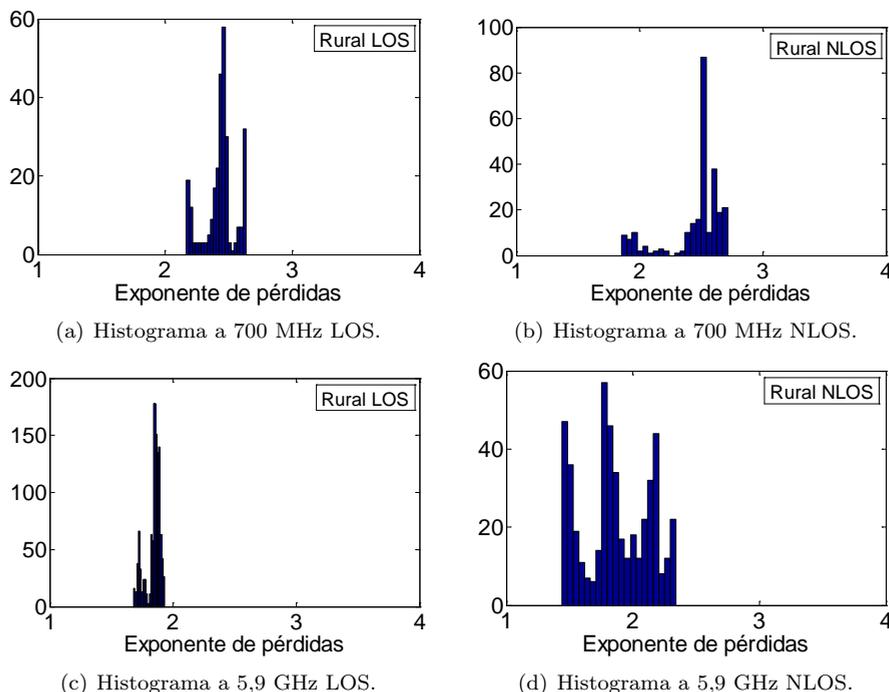


Figura 4.26: Histogramas del exponente de pérdidas para escenario rural, bajo condiciones LOS-NLOS.

de propagación. Asimismo, el mayor exponente de pérdidas de propagación aparece en entorno de autovía para 5,9 GHz y en escenario rural a 700 MHz.

Los resultados obtenidos para el exponente de pérdidas de propagación a 5,9 GHz concuerdan con los obtenidos en trabajos previos. En [24], [29] y [61] se han obtenido valores del exponente de pérdidas de propagación iguales a 1,61, 1,68 y 1,83, respectivamente, los cuales han sido medidos en escenarios urbanos, (en nuestro caso 1,77 y 1,70). Valores de 1,77, 1,85 y 2,21 han sido obtenidos por [29], [24] y [61] en escenario de autovía, respectivamente, (en nuestro caso 2,06). En [21], [24] y [29] se han obtenido valores de 2,1-2,5, 1,61 y 1,59 en escenarios suburbanos, en nuestro caso (1,96). En [24], se ha obtenido un valor de 1,70 en escenarios rurales, en nuestro caso (1,72). Es importante resaltar que no existen trabajos relacionados con la caracterización de las pérdidas de propagación a 700 MHz para comunicaciones vehiculares con el propósito de comparar nuestros resultados.

Con respecto al desvanecimiento a gran escala modelado por σ_S , tomando los valores medios, la señal recibida sufre las mayores variaciones en escenarios

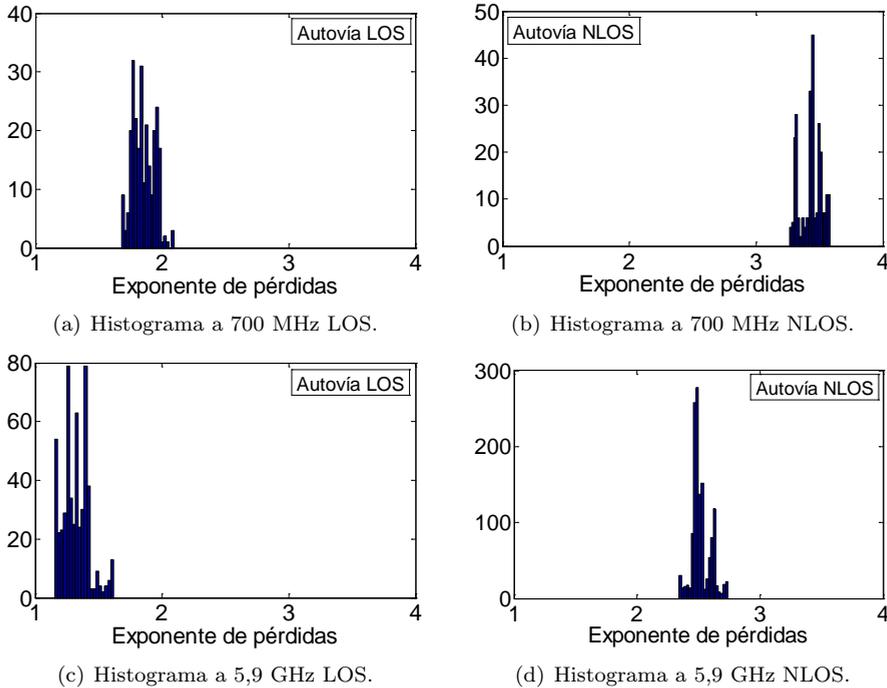


Figura 4.27: Histogramas del exponente de pérdidas para escenario de autovía, bajo condiciones LOS-NLOS.

urbano de baja densidad y suburbano a 700 MHz, y en escenarios suburbano y de autovía a 5,9 GHz. También se observa una mayor variación a 700 MHz que a 5,9 GHz, para los escenarios urbano de alta densidad y urbano de baja densidad, lo cual es de esperar. Desde el punto de vista teórico, a 700 MHz las ondas electromagnéticas se propagan más fácilmente a través de obstáculos y son menores las pérdidas por absorción en los edificios y otros materiales. Asimismo, la reflexión, dispersión y las pérdidas de difracción de las componentes multitrayecto son menores a 700 MHz que a 5,9 GHz.

Cabe resaltar que no ha sido posible encontrar una tendencia que nos permita explicar de manera general el comportamiento de σ_s . Esto puede ser debido a que dicho comportamiento se encuentra relacionado con la frecuencia y las características del escenario de propagación.

En la Tabla 4.15 se recopilan los valores de los parámetros, al igual que en el caso analizado anteriormente, tomando como referencia los valores medios obtenidos para cada parámetro.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2V

Tabla 4.14: Parámetros medios del modelo de pérdidas de propagación (métodos de análisis), a 700 MHz y 5,9 GHz.

Método	Escenario 1 (Urbano alta densidad)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
FR	2,06	29,63	5,55	1,60	56,74	5,56
RI	2,08	28,73	4,66	1,75	54,45	4,10
AVD	2,03	29,25	4,53	1,96	49,29	4,40
Medio	2,06	29,20	4,91	1,77	53,49	4,69
Método	Escenario 2 (Urbano baja densidad)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
FR	1,84	30,86	6,69	1,62	55,67	5,42
RI	1,78	31,76	5,83	1,66	55,79	4,45
AVD	1,86	30,58	5,98	1,82	51,76	4,35
Medio	1,83	31,07	6,17	1,70	54,41	4,74
Método	Escenario 3 (Suburbano)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
FR	3,30	8,09	7,97	1,97	48,80	6,70
RI	2,60	19,17	5,34	1,96	48,63	6,22
AVD	2,44	21,62	5,69	1,96	49,03	6,53
Medio	2,78	16,29	6,33	1,96	48,82	6,48
Método	Escenario 4 (Rural)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
FR	3,17	11,64	3,55	1,80	54,72	5,37
RI	2,92	16,63	3,56	1,79	55,48	5,15
AVD	2,67	20,14	2,71	1,57	58,24	5,30
Medio	2,92	16,14	3,27	1,72	56,15	5,27
Método	Escenario 5 (Autovía)					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
FR	2,91	17,56	4,75	2,12	48,56	6,31
RI	2,35	27,10	4,51	2,04	49,22	5,63
AVD	2,48	25,21	4,47	2,03	49,43	5,83
Medio	2,58	23,29	4,58	2,06	49,07	5,92

Los rangos del exponente de pérdidas de propagación teniendo en cuenta los valores mínimos y máximos oscilan desde 1,54 hasta 2,59 en LOS, y desde 2,18 hasta 3,43 en NLOS a 700 MHz y para el caso de 5,9 GHz oscilan desde

4.8 Análisis de resultados

Tabla 4.15: Parámetros medios del modelo de pérdidas de propagación (métodos de análisis LOS y NLOS), a 700 MHz y 5,9 GHz.

Método	Escenario 1 (Urbano alta densidad)											
	700 MHz						5.9 GHz					
	LOS			NLOS			LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
FR	1,74	32,30	5,33	3,20	14,10	6,28	1,75	53,50	5,22	1,49	61,70	5,44
RI	1,65	33,26	4,57	2,21	30,15	4,39	1,77	53,57	3,36	2,18	48,90	3,65
AVD	1,88	30,19	5,26	3,01	17,04	6,15	1,83	53,15	4,64	1,63	59,74	5,12
Medio	1,76	31,92	5,05	2,81	20,43	5,61	1,78	53,41	4,41	1,77	56,78	4,74
Método	Escenario 2 (Urbano baja densidad)											
	700 MHz						5.9 GHz					
	LOS			NLOS			LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
FR	1,71	32,51	5,54	3,23	9,31	7,21	1,61	55,17	5,68	1,73	56,37	7,07
RI	1,54	34,55	4,71	2,25	28,95	5,99	1,67	54,82	4,05	1,90	54,55	4,74
AVD	1,61	33,16	5,17	3,26	8,48	7,50	1,62	54,91	5,42	2,10	49,98	6,53
Medio	1,62	33,41	5,14	2,91	15,28	6,90	1,63	54,97	5,05	1,91	53,63	6,11
Método	Escenario 3 (Suburbano)											
	700 MHz						5.9 GHz					
	LOS			NLOS			LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
FR	2,20	29,40	6,24	2,76	24,90	5,90	2,13	42,04	4,29	2,13	48,40	5,97
RI	1,80	37,38	5,19	2,39	33,55	4,93	1,76	47,53	3,44	2,25	46,69	5,20
AVD	2,26	27,98	6,54	2,28	34,09	6,11	2,05	42,89	3,86	1,91	54,12	4,74
Medio	2,09	31,59	5,99	2,48	30,85	5,65	1,98	44,15	3,86	2,10	49,74	5,30
Método	Escenario 4 (Rural)											
	700 MHz						5.9 GHz					
	LOS			NLOS			LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
FR	2,59	21,28	3,35	2,18	29,51	1,99	1,71	55,24	4,30	1,91	53,56	4,90
RI	2,04	29,83	2,48	2,34	26,39	2,19	1,61	57,46	5,49	1,81	55,20	4,63
AVD	2,43	24,12	3,20	2,46	24,09	1,75	1,84	53,30	4,49	1,86	54,57	4,96
Medio	2,35	25,08	3,01	2,33	26,66	1,98	1,72	55,33	4,76	1,86	54,44	4,83
Método	Escenario 5 (Autovía)											
	700 MHz						5.9 GHz					
	LOS			NLOS			LOS			NLOS		
	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)	γ	L_0 (dB)	σ_S (dB)
FR	2,04	31,03	4,61	3,28	9,34	4,07	1,38	59,43	4,09	2,50	40,83	6,54
RI	1,64	37,92	4,46	2,98	17,33	3,63	1,66	54,02	3,68	2,53	39,39	5,94
AVD	1,85	34,16	4,76	3,43	5,08	4,00	1,32	60,92	4,26	2,52	40,35	6,42
Medio	1,84	33,37	4,61	3,23	10,58	3,90	1,45	58,12	4,01	2,52	40,19	6,30

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2V

1,32 hasta 2,13 en LOS, y desde 1,49 hasta 2,53 en NLOS. Conviene destacar que de acuerdo con estos resultados la distribución del exponente de pérdidas se encuentra sobre un rango de menor valor para el caso LOS que para el caso NLOS a 700 MHz y 5,9 GHz, como era de esperar.

Por otra parte, se puede resaltar que los valores recopilados en la Tabla 4.7 se encuentran entre los valores medios del exponente pérdidas de la Tabla 4.15 para la mayoría de los escenarios, a excepción de los escenarios urbano de alta densidad en NLOS a 5,9 GHz, suburbano en LOS a 700 MHz y NLOS a 5,9 GHz, y rural en LOS a 700 MHz y 5,9 GHz. Esto sugiere la necesidad de tener en cuenta las condiciones de propagación; es decir, LOS y NLOS para tener una mejor descripción del comportamiento del exponente de pérdidas de propagación.

Con el objeto de realizar un estudio más profundo de los valores obtenidos para el modelo de pérdidas de propagación dado por la Ec. (2.23), cuyos parámetros γ , L_0 y σ han sido obtenidos de manera experimental en nuestra campaña de medidas, se ha llevado a cabo un análisis de la variación de γ con respecto a L_0 . Además, posteriormente se justifica la obtención valores del exponente de pérdidas de propagación menores que 2.

Como resultado de la caracterización experimental del canal de propagación para escenarios V2V llevada a cabo en este trabajo, se ha determinado que el modelo lineal (ver Ec. (2.23)) queda restringido a distancias superiores que d_{min} , e inferiores que d_{max} las cuales corresponden a la mínima y máxima distancia de separación Tx-Rx obtenida de los registros medidos. En este sentido el modelo lineal viene dado por

$$L(d) = L_0 + 10\gamma \log_{10} d + S, \quad d_{min} \leq d \leq d_{max}, \quad (4.2)$$

donde el término

$$L_0 = L_0^* - 10\gamma \log_{10}(d_0), \quad (4.3)$$

Para comprender mejor el significado de L_0 se debe destacar que el valor de L_0^* dado en la Ec. (4.3) es dependiente de la distancia de referencia $d = d_0$ que típicamente para escenarios *indoor* toma valores de 1 m. Sin embargo la Ec. (4.2) muestra como el término L_0 no es el valor de pérdidas de propagación para cualquier distancia de referencia. Dado que los parámetros del modelo dado en la Ec. (4.2) han sido proporcionados por medio de regresiones lineales de los registros medidos, dichos parámetros son válidos únicamente para los rangos de distancias de separación Tx-Rx (d), para los cuales se han tomado las medidas, es decir, $d_{min} \leq d \leq d_{max}$.

En nuestro estudio d_{min} oscila desde 6,92 hasta 20,10 m. para los escenarios urbano de alta densidad y de autovía, respectivamente, (ver Tabla 4.2), con un valor mínimo de d_{max} igual a 174,43 m. y un valor máximo de d_{max} igual a 1475 m. para escenarios urbano de baja densidad y de autovía, respectivamente.

De igual manera, al realizar la clasificación en condiciones LOS y NLOS, d_{min} oscila desde 7,54 m. hasta 23,02 m. bajo condiciones LOS y desde 14,03 m. hasta 54,52 m. bajo condiciones NLOS para los escenarios urbano de alta densidad y de autovía, respectivamente, de acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 4.8. Igualmente, el valor mínimo de d_{max} es igual a 94,72 m. y el valor máximo de d_{max} es igual a 162,74 m. en condiciones LOS y un valor mínimo de d_{max} igual a 131,65 m. y un valor máximo de d_{max} igual a 1259,10 m. en condiciones NLOS, para escenarios rural y de autovía, respectivamente.

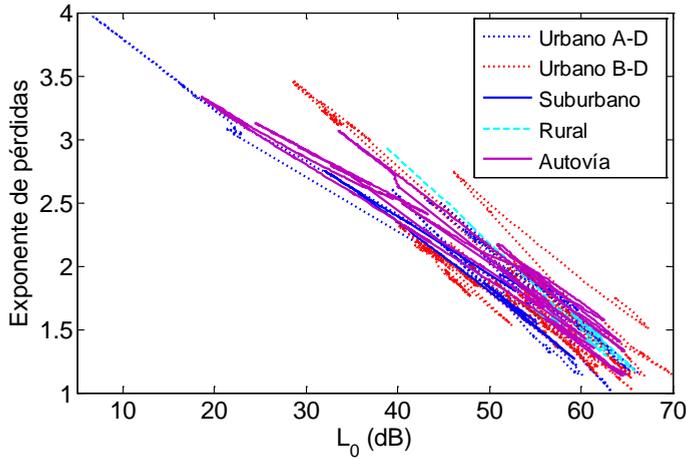


Figura 4.28: Relación entre el exponente de pérdidas y L_0 a 5,9 GHz.

Al realizar el análisis de los registros medidos se ha observado que un exponente de pérdidas menor que 2 no necesariamente corresponde a condiciones de propagación mejores que en el espacio libre. Por lo general, los valores del exponente de pérdidas de propagación menores que 2 se encuentran relacionados con valores de L_0 mayores que 47,85 dB (valor de L_0^* en espacio libre, a 5,9 GHz para una distancia de separación Tx-Rx de 1 m.). Esto significa que aunque el valor del exponente de pérdidas es menor que 2, el total de las pérdidas de propagación es mayor que las pérdidas de propagación en condiciones de espacio libre, como se esperaba.

La Fig. 4.28 muestra el comportamiento del exponente de pérdidas de propagación como una función de L_0 a 5,9 GHz, con coeficientes de correlación lineal de 0,97, 0,94, 0,95, 0,96 y 0,98 para los escenarios urbano de alta densidad, urbano de baja densidad, suburbano, rural y de autovía, respectivamente. De igual manera en la Fig. 4.29 se muestran los resultados obtenidos a 700 MHz, con coeficientes de correlación lineal de 0,94, 0,88, 0,66, 0,99 y 0,99 para los escenarios urbano de alta densidad, urbano de baja densidad, suburbano, rural

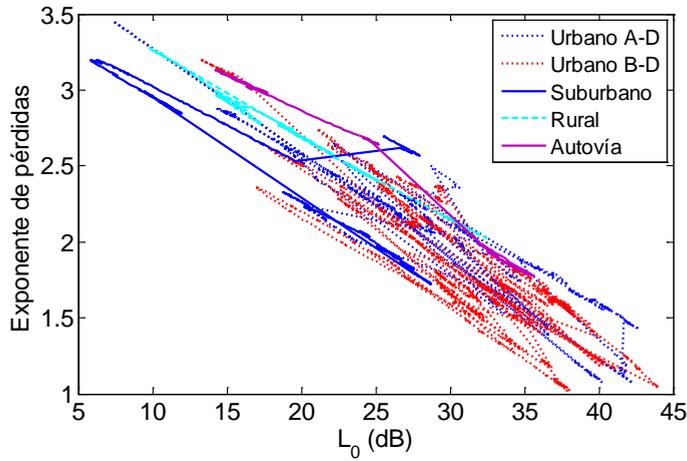


Figura 4.29: Relación entre el exponente de pérdidas y L_0 a 700 MHz.

y de autovía, respectivamente. Cabe resaltar que estas relaciones entre el exponente de pérdidas y L_0 se encuentran de acuerdo con los resultados aportados en [24] donde se han medido valores del exponente de pérdidas menores a 2.

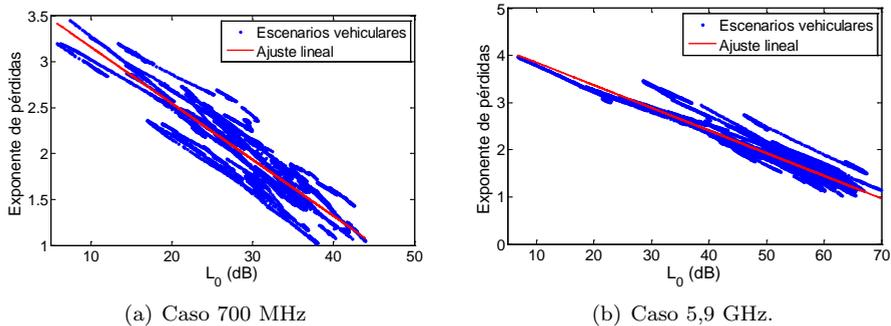


Figura 4.30: Ajuste lineal.

Con el propósito de establecer la relación entre γ y L_0 , en la Fig. 4.30 se muestra el ajuste lineal realizado sobre el total de los registros de datos medidos a 700 MHz y 5,9 GHz. A 700 MHz se obtiene un valor que relaciona γ y L_0 de 1,02 con un coeficiente de correlación lineal de 0,90, mientras que a 5,9 GHz se obtiene un valor de -0,01, con un coeficiente de correlación lineal de 0,95.

Capítulo 5

Resultados experimentales V2I

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la campaña de medidas del canal V2I, llevada a cabo en la ciudad de Valencia, España. A diferencia de la campaña de medidas del canal V2V, en esta se han realizado medidas en tres de los cinco escenarios: urbano con alta densidad de tráfico, urbano con baja densidad de tráfico y autovía, con el propósito de realizar una caracterización experimental del canal de comunicaciones V2I en banda estrecha. En este sentido se han procesado los registros obtenidos en las medidas para analizar el comportamiento de las pérdidas de propagación, dependiendo del entorno bajo estudio y la altura a la que se encuentra la antena del Tx, con el propósito de relacionar la atenuación que introduce el canal de comunicaciones con la distancia de separación Tx-Rx.

Cabe destacar que el modelo a tener en cuenta, es el mismo que se ha seguido para el caso de análisis V2V, (ver Ec. (2.23)). A continuación se presenta una breve descripción del método propuesto para el análisis de los registros de datos obtenidos de la campaña de medidas. Luego se proporcionan los resultados de los diferentes parámetros, clasificados en función del entorno de propagación, alturas de antena Tx y bandas de frecuencia, 700 MHz y 5,9 GHz. Al final se realiza un análisis de los resultados de esta investigación.

5.2. Descripción de la metodología utilizada para el análisis de las medidas

En esta investigación se ha intentado modelar el entorno de comunicaciones V2I, por medio de un elemento de infraestructura como antena transmisora y un vehículo como Rx, llevando a cabo una campaña de medidas para diferentes entornos y alturas del Tx, con el fin, de proponer modelos de propagación más precisos y de esa manera diseñar sistemas de comunicaciones vehiculares más seguros.

En nuestra campaña de medidas V2I se ha modelado una situación donde el Tx se sitúa en un punto intermedio entre el recorrido del vehículo Rx, variando el sentido de desplazamiento del mismo. A continuación se describen los pasos que se han llevado a cabo para el análisis de las medidas:

- Separación de los trayectos recorridos. Se debe analizar el comportamiento de cada uno de los registros de las medidas de potencia recibida en función de la distancia de separación Tx-Rx, con el propósito de identificar si el registro de datos del trayecto recorrido cuenta con uno o dos trayectos recorridos; es decir, si el comportamiento de la potencia recibida es el mismo cuando el vehículo Rx se acerca o se aleja del Tx. En el caso de observar un solo trayecto se debe analizar como un solo conjunto de medidas y por el contrario, al observar dos trayectos se debe realizar un análisis por separado.
- Análisis de los trayectos. Se debe realizar un filtrado de las medidas, buscando obtener una mayor precisión de los valores de los parámetros que se han de obtener al caracterizar el canal de propagación en el procesado de las mismas. Cabe destacar que para el cálculo de las pérdidas de propagación se debe tener en cuenta: el balance de potencias, la altura de la antena del Tx, si la antena se encontraba invertida o no en el momento de hacer las medidas, el patrón de radiación de las antenas y el sentido de desplazamiento del vehículo Rx.
- Obtención de los parámetros: Se realiza un análisis de regresión lineal de los datos experimentales de pérdidas de propagación ya filtrados, obtenidos al realizar las medidas en función de la distancia de separación Tx-Rx, para cada uno de los registros, con lo que se obtienen los valores de los parámetros γ , L_0 y σ_S .

A manera de ejemplo, se ilustran tres casos particulares, del comportamiento de las muestras de los registros obtenidos en la campaña de medidas V2I, (uno y dos trayectos, modelos a una y dos pendientes), para un escenario urbano de alta densidad de tráfico a 700 MHz y 5,9 GHz, con una altura de

5.2 Descripción de la metodología utilizada para el análisis de las medidas

antena transmisora denotada por h_{Tx} , igual a 3 m. y 4 m., respectivamente. Para los cuales se han empleado los pasos descritos anteriormente con el objeto de llevar a cabo el procesamiento de las medidas. Cabe resaltar que para el primer y tercer caso la antena se encuentra sin invertir y en el segundo caso la antena esta invertida.

1. Caso 1: Un trayecto, modelo a dos pendientes a 5,9 GHz

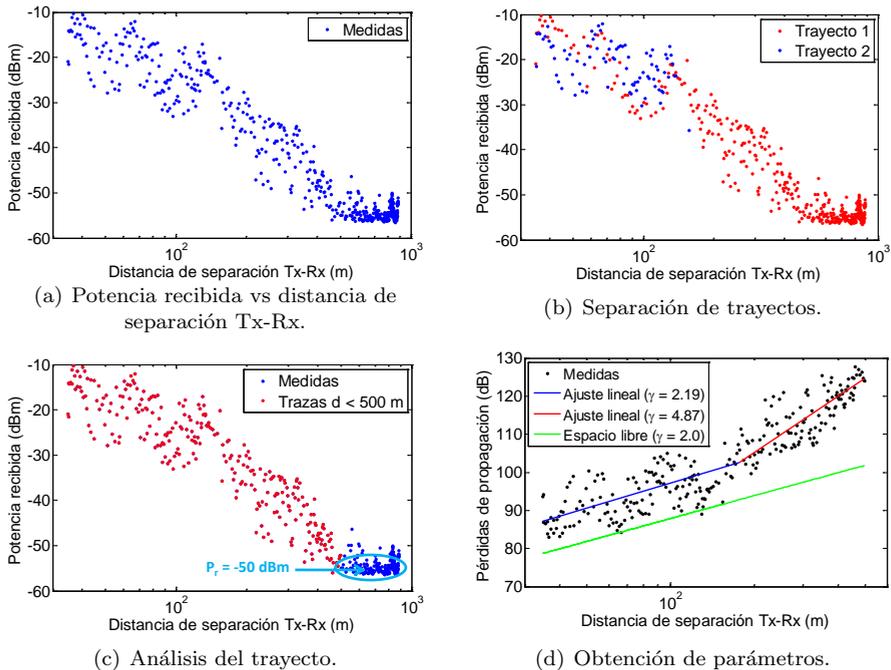


Figura 5.1: Caso 1: Escenario urbano alta densidad a 5,9 GHz, $h_{Tx} = 4$ m., antena del Tx sin invertir.

En la Fig. 5.1(a) se muestra el comportamiento de la potencia recibida en función de la distancia de separación Tx-Rx. En este caso es difícil apreciar la presencia de los dos trayectos. No obstante en la Fig. 5.1(b) se ilustra la presencia de ambos trayectos, que como se puede observar presentan el mismo comportamiento, por lo que en estos casos se ha tomado la decisión de analizar el registro de manera conjunta.

En la Fig. 5.1(c) se observa el proceso de filtrado que se realiza sobre las medidas. En este caso se han eliminado las trazas que se encuentran a una distancia de separación por encima de 500 m. dada la nube de puntos

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2I

que se forma sobre el nivel de ruido. La sensibilidad del Rx en este caso aproximadamente de $P_r = -50$ dBm.

La Fig. 5.1(d) ilustra las pérdidas de propagación para las medidas del registro. En este caso se ha aproximado por un modelo a dos pendientes. Asimismo, con el propósito de comparar se representan las pérdidas de propagación en el espacio libre. En los casos donde se aproxima por un modelo a dos pendientes se obtienen los parámetros $\gamma_1, \sigma_{S_1}, \gamma_2, \sigma_{S_2}, L_{0_1}$ y un valor de distancia crítica d_c , a partir de la cual se observa el cambio de pendiente. Para las medidas representadas los valores obtenidos son: $d_c = 176,59$ m. $\gamma_1 = 2,19$, $\sigma_{S_1} = 4,62$ dB, $L_{0_1} = 53,28$ dB, $\gamma_2 = 4,87$, $\sigma_{S_2} = 4,35$ dB.

2. Caso 2: Dos trayectos, modelo a una pendiente a 5,9 GHz

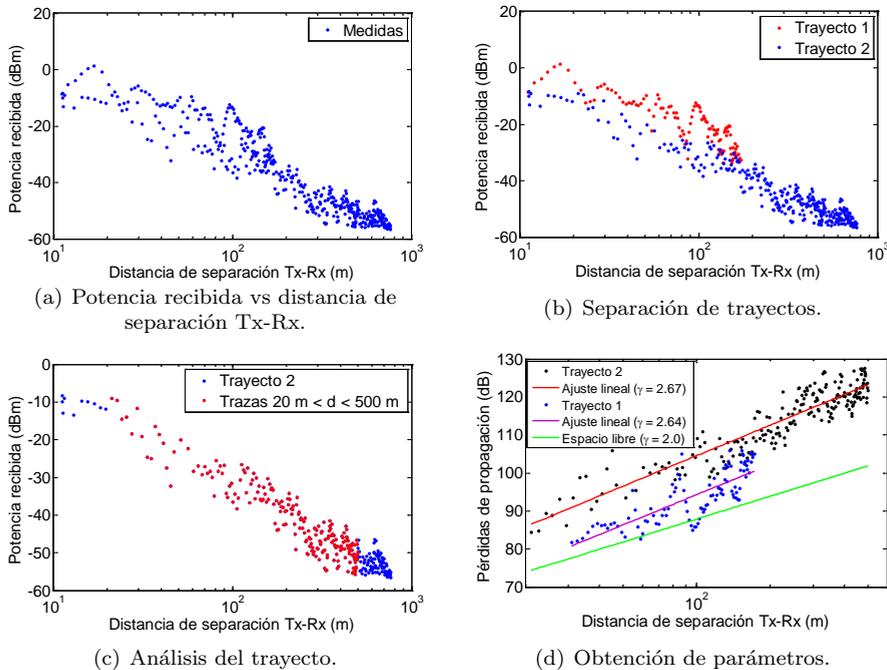


Figura 5.2: Caso 2: Escenario urbano alta densidad a 5,9 GHz, $h_{Tx} = 4,0$ m., antena del Tx invertida.

Al igual que en las medidas descritas anteriormente, la Fig. 5.2(a) muestra el comportamiento de la potencia recibida en función de la distancia de separación Tx-Rx. Conviene destacar que en este caso se puede intuir la

5.2 Descripción de la metodología utilizada para el análisis de las medidas

presencia de dos trayectos por las diferencias que se tienen en las medidas de potencia para valores de distancia de separación de aproximadamente hasta 180 m. En la Fig. 5.2(b) se ilustra claramente la presencia de los dos trayectos, lo cual implica que cuando se presenten este tipo de situaciones se tome la decisión de analizar el registro de datos separando los trayectos.

La Fig. 5.2(c) ilustra el proceso de filtrado que se realiza sobre el trayecto 2. Se observa como para distancias menores a 20 m. la potencia recibida presenta grandes variaciones debido al patrón de radiación de las antenas y para distancia superiores a 500 m. se tiene el comportamiento descrito anteriormente en lo referente al nivel de ruido, aproximadamente en $P_r = -50$ dBm.

La Fig. 5.2(d) muestra el comportamiento de las pérdidas de propagación para los dos trayectos, la recta de ajuste lineal para cada uno de los trayectos y las pérdidas de propagación en el espacio libre. Para las medidas representadas los valores obtenidos son: trayecto 1, $\gamma = 2,64$, $\sigma_S = 2,34$ dB y $L_{0_1} = 41,46$ dB; trayecto 2, $\gamma = 2,67$, $\sigma_S = 2,09$ dB y $L_{0_1} = 51,18$ dB. Cabe destacar que aunque el exponente de pérdidas de propagación es similar en los dos trayectos, el valor de L_{0_1} difiere en aproximadamente 10 dB.

3. Caso 3: Un trayecto, modelo a una pendiente a 700 MHz

La dinámica seguida es la misma que en los casos anteriores. Sin embargo, se hizo un cambio de ubicación de la antena transmisora con el objeto de tomar medidas en otra zona de la avenida de los naranjos.

La Fig. 5.3(a) ilustra el comportamiento de la potencia recibida en función de la distancia de separación Tx-Rx, en este caso no se puede intuir la presencia de los dos trayectos, esto sucede para todas las medidas realizadas este día en esta ubicación. En la Fig. 5.3(b) se ilustra la presencia de los dos trayectos, se observa que el comportamiento de la potencia recibida en ambos trayectos es similar, lo cual hace que se analicen de manera conjunta.

La Fig. 5.3(c) ilustra el proceso de filtrado que se realiza sobre las medidas. En este caso se han filtrado las trazas menores a 20 m. y las superiores a 550 m. También se puede observar que es mayor el alcance de la potencia recibida, al comparar con los casos mostrados anteriormente a 5,9 GHz, debido a la disminución de la frecuencia de portadora a 700 MHz. En este caso la sensibilidad del Rx es aproximadamente de $P_r = -70$ dBm.

La Fig. 5.3(d) ilustra las pérdidas de propagación, la recta de regresión lineal y las pérdidas de propagación en el espacio libre. Para las medidas representadas los valores obtenidos son: $\gamma = 3,37$, $\sigma_S = 3,06$ dB y $L_{0_1} = 6,44$ dB.

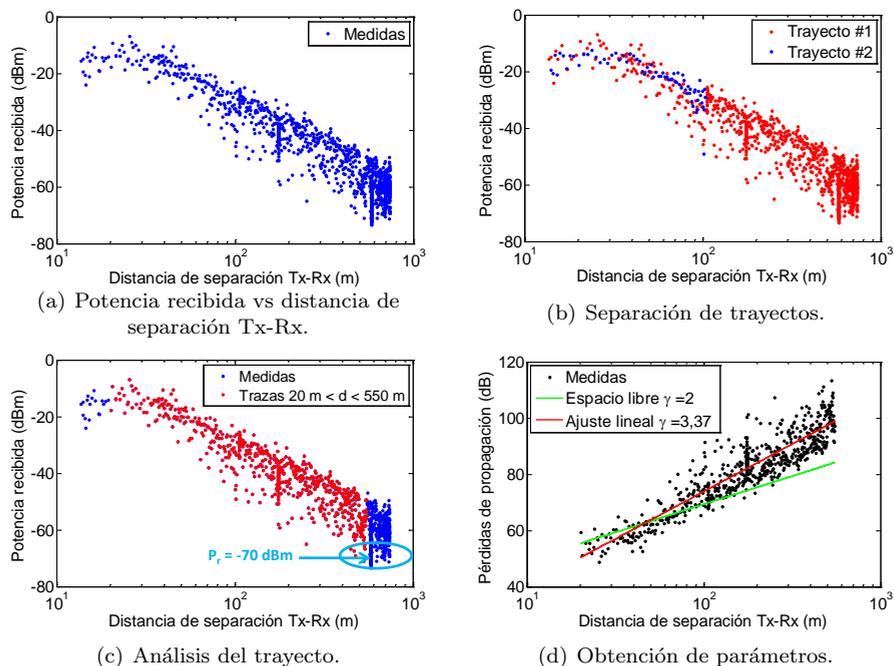


Figura 5.3: Caso 3: Escenario urbano alta densidad a 700 MHz, $h_{Tx} = 3,0$ m., antena del Tx sin invertir.

5.3. Resultados experimentales

En el presente apartado, se proporcionan los resultados obtenidos al analizar los registros medidos en nuestra campaña V2I, relacionados con la caracterización experimental del canal, clasificándolos por escenarios de propagación (ver sección 3.4.2).

5.3.1. Resultados escenario urbano alta densidad

- **Avenida de los Naranjos:**

Las medidas se han realizado en dos avenidas de la ciudad de Valencia. Éstas son Avenida de los Naranjos, la cual presenta una elevada densidad de tráfico y la Avenida General Avilés. Se han analizado diversos tramos para diferentes alturas, entre 2 m. y 5,5 m. sobre la superficie terrestre, tanto para antenas invertidas como sin invertir, con el fin de caracterizar el canal para cada zona medida. Asimismo, se han realizado medidas en paralelo, mediante la implementación de sondas de canal a 700 MHz y

5.3 Resultados experimentales



Figura 5.4: Avenida de los Naranjos.

Tabla 5.1: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad, sentido O-E.

Altura Tx (m)	Antena del Tx sin invertir, sentido O-E a 700 MHz						
	dc_e (m)	dc_t (m)	γ_1	L_{01} (dB)	σ_{S1} (dB)	γ_2	σ_{S2} (dB)
2,0	-	-	3,51	4,23	2,89	-	-
2,5	-	-	3,19	10,41	3,07	-	-
3,0	-	-	3,21	9,65	3,54	-	-
3,5	-	-	3,38	4,08	3,41	-	-
4,0	-	-	3,79	0,04	3,51	-	-
Altura Tx (m)	Antena del Tx sin invertir, sentido O-E a 5,9 GHz						
	dc_e (m)	dc_t (m)	γ_1	L_{01} (dB)	σ_{S1} (dB)	γ_2	σ_{S2} (dB)
2,0	95,92	228,13	2,01	56,24	3,06	3,06	4,24
2,0	-	-	2,44	48,20	2,80	-	-
2,5	-	-	3,02	35,99	2,49	-	-
3,0	81,29	342,2	2,48	45,76	3,23	3,45	4,14
3,0	-	-	2,70	42,54	2,99	-	-
3,5	103,37	399,23	2,23	51,81	3,27	4,29	5,05
4,0	175,58	456,27	2,12	55,17	4,67	4,94	4,28
4,5	-	-	2,75	44,10	3,03	-	-
5,0	-	-	2,84	43,41	2,92	-	-
5,5	-	-	2,17	56,12	3,07	-	-

5,9 GHz, con el propósito de establecer una relación que determine la dependencia de la frecuencia en la caracterización del canal de propagación V2I.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2I

Tabla 5.2: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad, sentido E-O.

Altura Tx (m)	Antena del Tx sin invertir, sentido E-O a 700 MHz						
	dc_e (m)	dc_t (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
2,0 T1	90,96	27,07	2,16	23,44	4,81	6,81	4,40
2,0 T2	136,90	27,07	2,68	21,04	4,02	4,33	4,32
2,5 T2	130,43	33,83	1,94	31,95	4,76	4,85	4,23
4,0 T2	252,59	54,13	1,90	31,93	2,79	7,67	3,20
Altura Tx (m)	Antena del Tx sin invertir, sentido E-O a 5,9 GHz						
	dc_e (m)	dc_t (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
2,0 T1	110,55	228,13	2,26	44,23	3,22	7,75	3,61
2,0 T1	-	-	2,69	38,21	2,75	-	-
2,0 T2	-	-	2,24	51,42	2,57	-	-
2,5 T1	98,94	285,17	2,54	42,01	3,43	6,79	3,39
2,5 T2	-	-	2,10	54,94	2,15	-	-
3,0 T2	-	-	2,62	47,01	2,42	-	-
3,5 T2	-	-	2,92	46,47	1,89	-	-
4,0 T1	-	-	3,04	31,30	3,17	-	-
4,0 T2	-	-	2,33	59,71	2,33	-	-
4,5 T2	-	-	3,33	35,27	2,12	-	-
5,0 T2	114,22	570,33	1,05	77,02	2,80	5,64	2,96

En la Fig. 5.4 se muestra la zona donde se han realizado las medidas ilustrando la ubicación de la antena transmisora y los lugares donde se han iniciado y finalizado los trayectos recorridos por el vehículo Rx. De igual manera, se muestran los dos sentidos de desplazamiento del vehículo Rx: de este a oeste traza de color amarillo, representado por E-O y de oeste a este traza de color azul representado por O-E.

En las Tablas 5.1-5.4, se recopilan los valores medios de los parámetros que caracterizan el modelo de pérdidas del canal V2I, para cada una de las alturas en las que se han realizado las medidas, obtenidos en nuestra campaña de medidas a 700 MHz y 5,9 GHz, para los cuatro posibles casos analizados; es decir, las combinaciones dadas por el sentido de desplazamiento del vehículo Rx y si la antena del Tx se encontraba invertida o no en el momento de realizar las medidas. Cabe resaltar que el valor de la altura estará acompañado mediante la letra "i" si la antena estaba invertida en el momento de efectuar la medición y con "T1" o "T2" haciendo referencia al trayecto 1 ó 2, respectivamente. Asimismo, la distancia crítica experimental se representa por dc_e y la distancia crítica teórica se representa por dc_t

5.3 Resultados experimentales

Tabla 5.3: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad, sentido O-E.

Altura Tx (m)	Antena del Tx invertida, sentido O-E a 700 MHz						
	dc_e (m)	dc_t (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
2,0i	-	-	3,32	6,70	3,42	-	-
2,5i	-	-	3,09	12,75	3,55	-	-
3,0i	-	-	3,43	5,16	2,75	-	-
3,5i	-	-	3,06	13,09	3,11	-	-
4,0i	-	-	3,31	6,96	2,73	-	-
4,5i	-	-	3,35	5,97	3,24	-	-
5,0i	-	-	3,22	9,56	3,38	-	-
Altura Tx (m)	Antena del Tx invertida, sentido O-E a 5,9 GHz						
	dc_e (m)	dc_t (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
2,0i	-	-	3,11	38,21	2,21	-	-
2,5i	-	-	2,89	38,14	2,58	-	-
3,0i	-	-	3,15	34,21	2,50	-	-
3,5i	106,59	399,23	1,86	58,17	3,66	4,19	3,77
4,0i	224,59	456,27	2,48	49,45	4,65	4,85	4,17
4,5i	-	-	2,94	41,91	2,61	-	-
5,0i	-	-	2,59	50,55	2,88	-	-



Figura 5.5: Avenida de los Naranjos.

Con el propósito de medir otra zona de la Avenida de los Naranjos se ha ubicado el Tx en otra posición en dicha avenida. En la Fig. 5.5 se muestra la ubicación de la antena transmisora y se ilustran los sitios donde se ha iniciado y finalizado el trayecto recorrido por el vehículo Rx.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2I

Tabla 5.4: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad, sentido E-O.

Altura Tx (m)	Antena del Tx invertida, sentido E-O a 700 MHz						
	dc_e (m)	dc_t (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
2,0i T2	157,96	27,07	2,26	22,81	3,27	5,27	4,01
3,0i T1	108,41	40,60	3,03	1,53	3,17	8,21	4,34
3,5i	55,09	47,37	1,10	39,62	3,80	4,61	4,75
4,5i	64,16	60,90	1,87	28,81	3,75	4,34	5,19
5,0i T1	130,86	67,67	1,27	40,49	5,75	11,92	4,74
Altura Tx (m)	Antena del Tx invertida, sentido E-O a 5,9 GHz						
	dc_e (m)	dc_t (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
2,0i T1	114,70	228,13	2,70	36,81	2,49	7,57	4,08
2,0i T2	-	-	1,45	71,51	2,03	-	-
2,5i	-	-	2,23	49,71	2,72	-	-
3,0i T1	124,45	342,20	1,25	62,47	3,02	12,19	3,02
3,0i T2	-	-	2,27	52,52	2,53	-	-
3,5i T2	-	-	2,61	49,13	2,55	-	-
4,0i T2	77,75	456,27	2,10	61,28	3,48	3,36	3,81
4,0i T1	-	-	3,18	30,64	2,31	-	-
4,0i T2	-	-	2,39	56,23	2,79	-	-
4,5i T1	80,68	513,30	1,97	52,38	2,59	5,82	4,05
4,5i T2	-	-	3,15	39,60	2,52	-	-
5,0i T2	-	-	1,90	65,27	2,78	-	-

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.5. Como característica importante se observa que para esta situación no es posible distinguir trayectos diferentes como en los casos anteriormente descritos.

■ Avenida General Avilés.

El procedimiento de medida efectuado en esta segunda avenida es la mismo, es decir, una situación donde el Tx se sitúa en un punto intermedio de los recorridos hechos por el vehículo Rx. En la Fig. 5.6 se muestra como para este caso las antenas se encuentran invertidas y a diferencia de los casos analizados anteriormente, en éste, la altura viene fijada por la pasarela del puente, $h_{Tx} = 5,25$ m.

En la Fig. 5.7 se ilustran varias situaciones del escenario de medida. A manera de ejemplo las Figs. 5.7(c) y 5.7(d) muestran un aspecto de la instalación de la antena sobre la pasarela ilustrando la ubicación de la antena del Tx, es decir, a la derecha, en el centro y a la izquierda.

Al igual que para el caso de la Avenida de los Naranjos, en este escenario se han analizado dos tramos, el primero comprendido entre el inicio de

5.3 Resultados experimentales

Tabla 5.5: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad (cambio de posición de la antena del Tx).

Altura Tx (m)	Antena Tx sin invertir a 700 MHz						
	dc_e (m)	dc_t (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
2,5	31,31	33,83	1,22	38,29	3,33	3,48	4,89
3,0	-	-	3,37	6,44	3,06	-	-
3,5	-	-	3,46	3,48	3,47	-	-
4,0	43,65	54,13	1,37	38,59	4,13	3,25	4,08
4,5	-	-	3,29	11,14	3,58	-	-
5,0	89,37	67,67	1,26	46,80	5,72	3,44	4,50
5,5	-	-	2,82	20,66	3,24	-	-
Altura Tx (m)	Antena Tx sin invertir a 5,9 GHz						
	dc_e (m)	dc_t (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
2,5	-	-	2,64	44,65	3,22	-	-
3,0	-	-	2,72	43,45	3,38	-	-
3,5	-	-	2,50	46,92	3,16	-	-
4,0	-	-	2,22	52,47	2,64	-	-
4,5	-	-	2,32	51,82	3,01	-	-
5,0	-	-	2,43	48,98	2,78	-	-
5,5	-	-	2,23	52,71	2,83	-	-
Altura Tx (m)	Antena Tx invertida a 700 MHz						
	dc_e (m)	dc_t (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
2,5i	-	-	2,64	27,16	2,05	-	-
3,0i	-	-	3,30	12,67	3,33	-	-
3,5i	-	-	2,97	19,52	3,14	-	-
4,0i	-	-	3,20	14,39	3,47	-	-
4,5i	-	-	3,58	1,71	2,90	-	-
5,0i	-	-	2,58	28,35	3,65	-	-
5,5i	-	-	2,69	22,78	3,96	-	-
Altura Tx (m)	Antena Tx invertida a 5,9 GHz						
	dc_e (m)	dc_t (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
2,5i	121,85	285,17	2,00	56,28	4,43	2,71	4,90
3,0i	-	-	2,44	52,28	2,90	-	-
3,5i	291,81	399,23	1,79	63,63	4,54	5,19	4,19
4,0i	-	-	2,05	57,93	2,66	-	-
4,5i	-	-	2,70	47,26	2,77	-	-
5,0i	-	-	1,93	64,65	3,02	-	-
5,5i	-	-	2,31	54,78	2,57	-	-

la medida y el Tx, y el otro comprendido desde el Tx hasta el final de la



Figura 5.6: Ubicación antenas en la pasarela.



(a) Zona de servicio.



(b) Vista en sitio.



(c) Vista a la derecha desde la pasarela.



(d) Vista a la izquierda desde la pasarela.

Figura 5.7: Escenario urbano alta densidad, pasarela.

Tabla 5.6: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad, pasarela a 700 MHz.

Recorrido	Antena del Tx a la derecha hacia Hipercore					
	dc_e (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
R1	-	2,89	2,87	2,87	-	-
R2	-	2,20	18,88	3,98	-	-
R2	217,78	2,52	12,47	5,57	6,60	4,11
R1-T2	162,69	2,44	15,96	2,71	4,38	4,42
Recorrido	Antena del Tx en el centro					
	dc_e (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
R1-T1	-	2,27	27,19	3,46	-	-
R1-T2	-	2,15	23,16	4,52	-	-
R2-T1	383,02	1,94	22,82	5,30	6,31	5,23
R2-T2	-	2,29	23,88	3,07	-	-
Recorrido	Antena del Tx a la izquierda hacia Hipercore					
	dc_e (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
R2	275,78	2,16	23,07	5,72	5,12	5,92
R1-T1	160,56	2,31	15,81	5,52	6,55	4,04
R1-T2	157,75	1,22	39,55	2,97	4,26	5,87
R2-T1	320,83	2,66	8,69	4,24	5,74	5,14
R2-T2	-	1,27	43,30	2,96	-	-

medida. Los resultados obtenidos son presentados en las Tablas 5.6 y 5.7 a 700 MHz y 5,9 GHz, respectivamente.

5.3.2. Resultados escenario de autovía (pasarela)

Esta autovía cuenta con dos carriles de circulación en ambos sentidos con una mediana ajardinada a modo de separación, como se muestra en la Fig. 5.8. En este caso, el Tx se ubica en un punto situado dentro del recorrido del Rx, el cual a su vez recorre en un sentido y otro la vía. Análogamente, el estudio se ha realizado por trayectos; el primero que se corresponde con la distancia entre que el Rx inicia la medida y llega al Tx, y el otro tramo que se corresponde desde el Tx y el fin del recorrido. Asimismo, las alturas que se han utilizado para realizar las medidas son: 3,68 m. y 5,14 m. En la Tabla 5.8 se muestran los resultados obtenidos para esta autovía a 700 MHz y 5,9 GHz.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2I

Tabla 5.7: Parámetros del modelo de pérdidas de propagación. Escenario urbano alta densidad, pasarela a 5,9 GHz.

Recorrido	Antena del Tx a la derecha hacia Hipercore					
	dc_e (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
R1	-	1,78	80,35	1,75	-	-
R2-T1	-	2,90	52,49	1,55	-	-
R2-T2	-	1,27	87,64	2,25	-	-
R1-T1	-	1,49	83,06	2,04	-	-
R1-T2	-	1,78	80,57	1,33	-	-
Recorrido	Antena del Tx en el centro					
	dc_e (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
R1-T1	-	2,38	70,78	1,24	-	-
R1-T2	-	1,55	82,62	2,20	-	-
R2-T1	-	1,21	89,27	2,40	-	-
R2-T2	-	1,76	82,84	1,47	-	-
Recorrido	Antena del Tx a la izquierda hacia Hipercore					
	dc_e (m)	γ_1	L_{0_1} (dB)	σ_{S_1} (dB)	γ_2	σ_{S_2} (dB)
R1	-	1,75	82,56	2,00	-	-
R2	-	1,31	91,76	2,03	-	-
R2-T1	-	1,32	90,72	1,81	-	-
R2-T2	-	1,60	87,92	1,62	-	-

5.4. Análisis de resultados

Se ha realizado un análisis de los registros obtenidos en nuestra campaña de medidas para el escenario urbano de alta densidad, con el propósito de establecer la relación entre el exponente de pérdidas de propagación y la altura de la antena del Tx. En las Figs. 5.9 y 5.10 se muestra el comportamiento del exponente de pérdidas de propagación para las alturas de la antena del Tx en las que se han obtenido los registros medidos, a 700 MHz y 5,9 GHz, respectivamente. En traza de color azul se muestra el comportamiento del valor medio del exponente de pérdidas para el caso de la antena del Tx sin invertir, mientras que en trazo rojo se muestra el comportamiento del valor medio del exponente de pérdidas para el caso de la antena del Tx invertida.

En la Tabla 5.9 se han recopilado los valores máximos medios y mínimos del exponente de pérdidas (para el caso de la antena del Tx invertida se ha denotado por γ_i), a 700 MHz y 5,9 GHz, teniendo en cuenta; la altura de la



Figura 5.8: Escenario de autovía (pasarela).

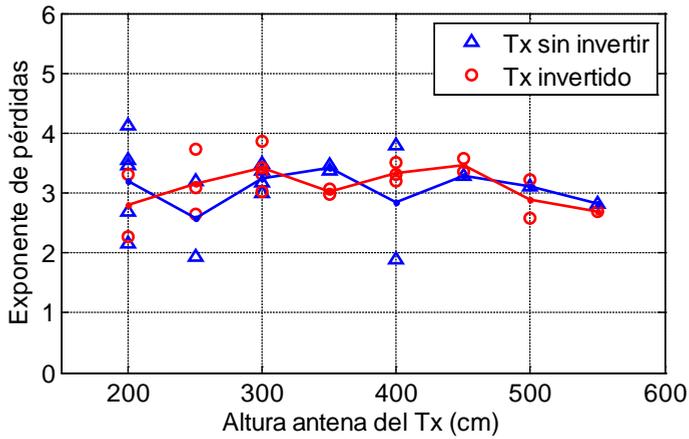


Figura 5.9: Valores de γ a 700 MHz.

antena del Tx y si la antena del Tx estaba invertida o no en el momento de realizar las medidas. En [62] los autores han llevado a cabo medidas para varias alturas de antenas en escenarios urbanos y han aportado valores del exponente de pérdidas de 3 para el caso de condiciones de propagación LOS y de 4 para el caso NLOS.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2I

Tabla 5.8: Escenario de autovía, a 700 MHz y 5,9 GHz, pasarela Bonaire.

Recorrido	Altura antena Tx 3,68 m, a 700 MHz.							
	Recorrido R1:Valencia-Madrid				Recorrido R2:Madrid-Valencia			
	dc_e	dc_t	γ_1	L_{0_1}	σ_{S_1}	γ_2	σ_{S_2}	
	(m)	(m)		(dB)	(dB)		(dB)	
R1-T1	-	-	3,90	-6,60	2,54	-	-	
R1-T2	-	-	2,71	27,75	2,76	-	-	
R2-T1	-	-	3,63	4,73	2,49	-	-	
R2-T2	-	-	3,20	6,20	2,45	-	-	
Recorrido	Altura antena Tx 3,68 m, a 5,9 GHz.							
	Recorrido R1:Valencia-Madrid				Recorrido R2:Madrid-Valencia			
	dc_e	dc_t	γ_1	L_{0_1}	σ_{S_1}	γ_2	σ_{S_2}	
	(m)	(m)		(dB)	(dB)		(dB)	
R1-T1	-	-	2,71	36,61	2,68	-	-	
R1-T2	-	-	2,50	59,85	1,51	-	-	
R2-T1	-	-	2,99	47,70	1,36	-	-	
R2-T2	379,88	419,77	2,43	42,33	3,54	4,62	3,23	
Recorrido	Altura antena Tx 5,14 m, a 700 MHz.							
	Recorrido R1:Valencia-Madrid				Recorrido R2:Madrid-Valencia			
	dc_e	dc_t	γ_1	L_{0_1}	σ_{S_1}	γ_2	σ_{S_2}	
	(m)	(m)		(dB)	(dB)		(dB)	
R1-T1	-	-	3,77	-2,79	2,43	-	-	
R1-T2	-	-	2,14	41,90	1,81	-	-	
R2-T1	-	-	4,15	-5,96	2,69	-	-	
R2-T2	-	-	2,59	24,36	2,69	-	-	
Recorrido	Altura antena Tx 5,14 m, a 5,9 GHz.							
	Recorrido R1:Valencia-Madrid				Recorrido R2:Madrid-Valencia			
	dc_e	dc_t	γ_1	L_0	σ_{S_1}	γ_2	σ_{S_2}	
	(m)	(m)		(dB)	(dB)		(dB)	
R1-T1	-	-	2,53	40,51	2,57	-	-	
R1-T2	-	-	2,64	58,64	1,62	-	-	
R2-T1	-	-	2,67	56,70	1,44	-	-	
R2-T2	-	-	1,98	52,02	2,26	-	-	
R2-T2	272,42	586,30	2,05	50,43	2,56	3,60	3,25	

Los valores del exponente de pérdidas para escenario urbano alta densidad y con $h_{Tx} = 5,25$ m. (véase Tablas 5.6 y 5.7, oscilan desde 1,22 hasta 2,97 con valor medio de 2,23 a 700 MHz, mientras que a 5,9 GHz oscilan desde 1,21 hasta 2,90 con valor medio de 1,70. Cabe resaltar que los valores medios se encuentran por debajo de los valores medios obtenidos del exponente de pérdidas de propagación para el caso de la antena invertida 2,90 y 2,69 a 700 MHz y 2,14 y 2,31 a 5,9 GHz, (ver Tabla 5.9), para alturas del Tx de 5 m. y 5.5 m., respectivamente.

Los valores del exponente de pérdidas correspondientes a la Tabla 5.8 obtenidos para el escenario de autovía, donde la antena del Tx se ha instalado sobre

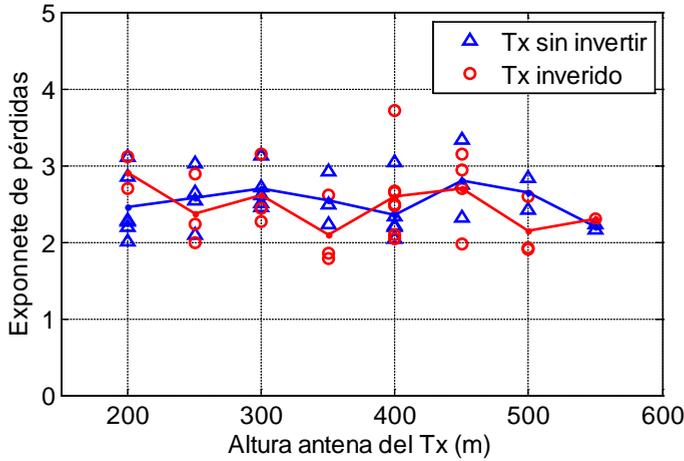


Figura 5.10: Valores de γ a 5,9 GHz.

la pasarela para alturas del Tx de 3,68 m. y 5,14 m., oscilan desde 2,71 hasta 3,63 con valor medio de 3,18 para $h_{Tx} = 3,68$ m. y oscilan desde 2,14 hasta 2,59 con valor medio de 2,36 para $h_{Tx} = 5,14$ m. a 700 MHz. A 5,9 GHz dichos valores oscilan desde 2,43 hasta 2,99 con valor medio de 2,66 para $h_{Tx} = 3,68$ m. y oscilan desde 1,98 hasta 2,67 con valor medio de 2,37 para $h_{Tx} = 5,14$ m.

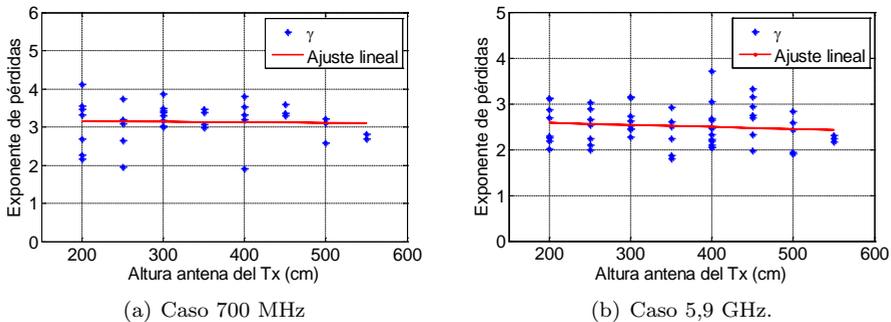


Figura 5.11: Ajuste lineal.

Con el propósito de establecer la relación entre γ y h_{Tx} , en la Fig. 5.11 se muestra el ajuste lineal realizado sobre el total de los registros de datos medidos a 700 MHz y 5,9 GHz. Se observa (línea en trazo rojo) que el exponente de pérdidas presenta una baja variación, por lo que se obtiene una baja correlación.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2I

Tabla 5.9: Estadísticas del exponente de pérdidas de propagación en función de la altura del Tx, a 700 MHz y 5,9 GHz.

Valor/ Parámetro	Altura del Tx $h_{tx} = 200$ cm.							
	Frecuencia 700 MHz				Frecuencia 5,9 GHz			
	Máx	Media	Mín	Desv	Máx	Media	Mín	Desv
γ	4,12	3,19	2,16	0,77	3,12	2,46	2,01	0,43
γ_i	3,32	2,79	2,26	0,75	3,11	2,91	2,70	0,29
Valor/ Parámetro	Altura del Tx $h_{tx} = 250$ cm.							
	Frecuencia 700 MHz				Frecuencia 5,9 GHz			
	Máx	Media	Mín	Desv	Máx	Media	Mín	Desv
γ	3,19	2,57	1,94	0,88	3,02	2,58	2,10	0,38
γ_i	3,74	3,16	2,64	0,55	2,89	2,37	2,00	0,46
Valor/ Parámetro	Altura del Tx $h_{tx} = 300$ cm.							
	Frecuencia 700 MHz				Frecuencia 5,9 GHz			
	Máx	Media	Mín	Desv	Máx	Media	Mín	Desv
γ	3,48	3,25	2,99	0,22	3,13	2,69	2,45	0,27
γ_i	3,87	3,41	3,03	0,35	3,15	2,62	2,27	0,47
Valor/ Parámetro	Altura del Tx $h_{tx} = 350$ cm.							
	Frecuencia 700 MHz				Frecuencia 5,9 GHz			
	Máx	Media	Mín	Desv	Máx	Media	Mín	Desv
γ	3,46	3,42	3,38	0,06	2,92	2,55	2,23	0,35
γ_i	3,06	3,02	2,97	0,06	2,61	2,09	1,79	0,45
Valor/ Parámetro	Altura del Tx $h_{tx} = 400$ cm.							
	Frecuencia 700 MHz				Frecuencia 5,9 GHz			
	Máx	Media	Mín	Desv	Máx	Media	Mín	Desv
γ	3,79	2,85	1,90	1,34	3,04	2,36	2,04	0,39
γ_i	3,52	3,34	3,20	0,16	3,71	2,59	2,05	0,55
Valor/ Parámetro	Altura del Tx $h_{tx} = 450$ cm.							
	Frecuencia 700 MHz				Frecuencia 5,9 GHz			
	Máx	Media	Mín	Desv	Máx	Media	Mín	Desv
γ	-	3,29	-	-	3,33	2,80	2,32	0,51
γ_i	3,58	3,47	3,35	0,16	3,15	2,69	1,97	0,51
Valor/ Parámetro	Altura del Tx $h_{tx} = 500$ cm.							
	Frecuencia 700 MHz				Frecuencia 5,9 GHz			
	Máx	Media	Mín	Desv	Máx	Media	Mín	Desv
γ	-	3,11	-	-	2,84	2,64	2,43	0,29
γ_i	3,22	2,90	2,58	0,45	2,59	2,14	1,90	0,39
Valor/ Parámetro	Altura del Tx $h_{tx} = 550$ cm.							
	Frecuencia 700 MHz				Frecuencia 5,9 GHz			
	Máx	Media	Mín	Desv	Máx	Media	Mín	Desv
γ	-	2,82	-	-	2,23	2,20	2,17	0,04
γ_i	-	2,69	-	-	-	2,31	-	-

De igual manera el exponente de pérdidas decrece a medida que aumenta la altura de la antena del Tx, como era de esperar.

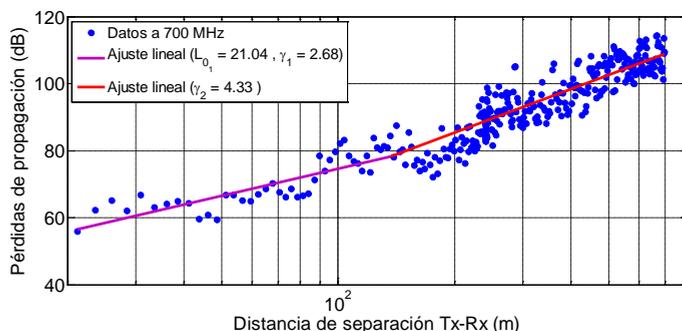


Figura 5.12: Modelo a doble pendiente a 700 MHz.

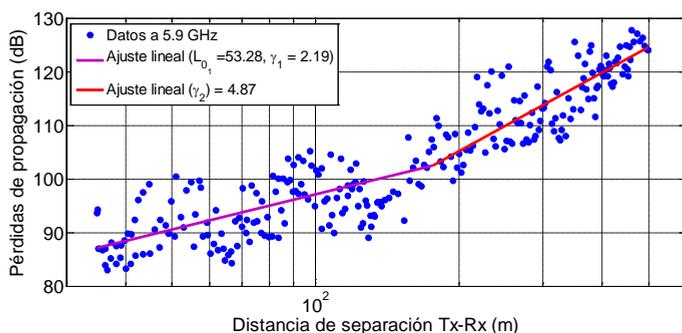


Figura 5.13: Modelo a doble pendiente a 5,9 GHz.

Por otra parte, en las las Figs. 5.12 y 5.13 muestran dos situaciones en las que se observa un comportamiento a doble pendiente para el escenario urbano de alta densidad a 700 MHz y 5,9 GHz. De manera que aplicando un ajuste lineal por mínimos cuadrados (curva magenta para la primer pendiente y curva roja para la segunda pendiente se obtiene: $L_{01} = 21,04$ dB, $\gamma_1 = 2,68$, $\sigma_{S_1} = 4,02$ dB, $\gamma_2 = 4,33$ y $\sigma_{S_2} = 4,32$, con una distancia crítica, denotada por dc_e igual a 136,9 m. a 700 MHz y $L_{01} = 53,28$ dB, $\gamma_1 = 2,19$, $\sigma_{S_1} = 4,62$ dB, $\gamma_2 = 4,87$ y $\sigma_{S_2} = 4,35$, con dc_e igual a 176,59 m. a 5,9 GHz.

Se ha llevado a cabo el análisis del comportamiento de la distancia crítica experimental obtenida, representada por dc_e , a partir del procesado de los registros medidos en nuestra campaña de medidas. Las Figs. 5.14 y 5.15 muestran la dependencia que existe entre la distancia crítica experimental y la distancia

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2I

crítica teórica representada por dc_t expresada por $dc_t = kh_{Tx}h_{Rx}/\lambda_c$, con $k = 4$ según [33], a 700 MHz y 5,9 GHz, respectivamente. Aunque, k puede tomar valores diferentes, por ejemplo en [32] proponen un valor de $k = 2\pi$, mientras que en [18], [37] los autores proponen un valor de $k = 8$ para el modelo de pérdidas de propagación en condiciones LOS (ver Ec.(2.34)).

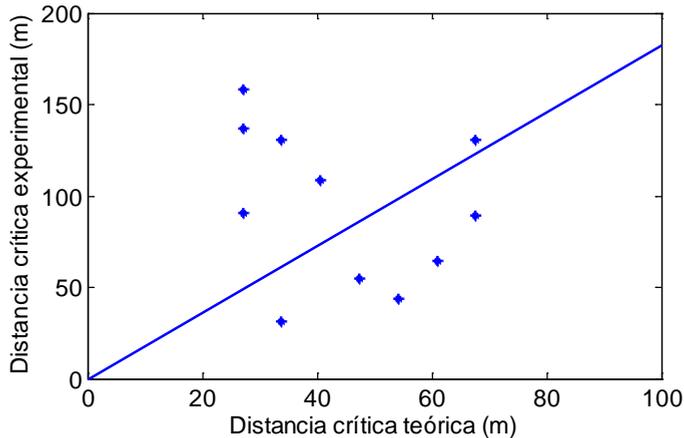


Figura 5.14: Relación entre la distancia crítica experimental y la distancia crítica teórica a 700 MHz.

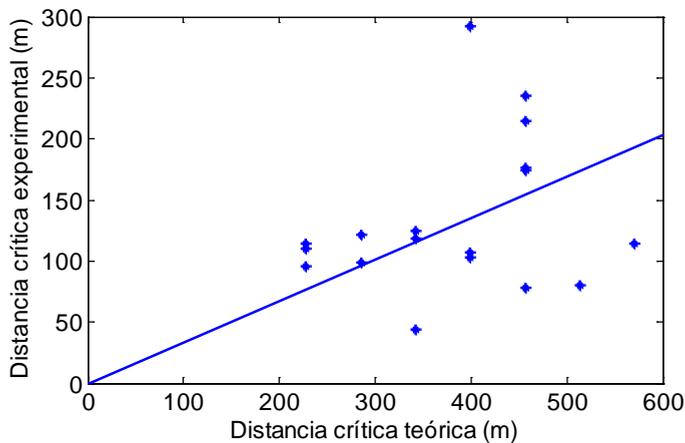


Figura 5.15: Relación entre la distancia crítica experimental y la distancia crítica teórica a 5,9 GHz.

Al realizar el ajuste lineal (línea en trazo azul) se obtiene el valor que relaciona la distancia crítica, experimental con la distancia crítica teórica, representado por D . Para el caso a 700 MHz se obtiene un valor de $D = 1,8241$, con el cual se ha calculado un valor experimental de $k = 7,2958$, mientras que a 5,9 GHz se obtiene un valor de $D = 0,3391$ con el que se ha calculado un valor experimental de $k = 1,3564$.

Tabla 5.10: Compensación de la altura efectiva del terreno, h_0 . Escenario urbano de alta densidad (A-D), de acuerdo con el valor de D .

Altura (cm)	Escenario urbano A-D					
	Frecuencia 700 MHz, $D = 1,8241$			Frecuencia 5,9 GHz, $D = 0,3391$		
	dc_e (m)	dc_t (m)	h_0	dc_e (m)	dc_t (m)	h_0
200	49,38	27,07	-0,5915	77,36	228,13	0,6959
250	61,71	33,83	-0,6493	96,70	285,17	0,7483
300	74,06	40,60	-0,6965	116,04	342,20	0,7843
350	86,41	47,37	-0,7357	135,38	399,23	0,8102
400	98,74	54,13	-0,7685	154,72	456,27	0,8296
450	111,08	60,90	-0,7969	174,06	513,30	0,8447
500	123,43	67,67	-0,8217	193,40	570,33	0,8567
550	135,76	74,43	-0,8432	212,74	627,37	0,8664

En la práctica, la distancia crítica está relacionada con las características de propagación del medio, por lo que algunos autores [30], [34], emplean una constante de compensación de altura efectiva del terreno, representada por h_0 (ver Ec. (2.25)), para modelar las diferentes condiciones de propagación. Analizando los resultados, se puede observar que a 700 MHz, la distancia crítica experimental es mayor que la teórica, mientras que a 5,9 GHz la distancia crítica experimental es considerablemente menor que la teórica. La Tabla 5.10 muestra los valores obtenidos de h_0 , teniendo en cuenta el valor que relaciona la distancia crítica experimental y la distancia crítica teórica a 700 MHz y 5,9 GHz, respectivamente. Se observa la tendencia que tiene h_0 de disminuir a medida que la altura de la antena del Tx crece para el caso de 700 MHz, mientras que a 5,9 GHz la tendencia de h_0 es aumentar a medida que la altura de la antena del Tx es mayor.

En la Fig. 5.16 se muestra la relación entre el valor de la distancia crítica experimental media, representada por $\overline{dc_e}$ y la distancia crítica teórica. Al realizar el ajuste lineal se obtiene el valor que relaciona estas distancia. Para el caso a 700 MHz el valor es 1,9682 con el cual obtenemos un valor experimental de $k = 7,8722$, mientras que a 5,9 GHz el valor es 0,2602 con lo cual se obtiene un valor experimental de $k = 1,0407$.

En la Fig. 5.17 se muestra el comportamiento de la constante de compensación de altura efectiva del terreno con respecto a de la distancia crítica experimental media, $\overline{dc_e}$, obtenida para cada altura del Tx, a 700 Mhz y 5,9 GHz.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES V2I

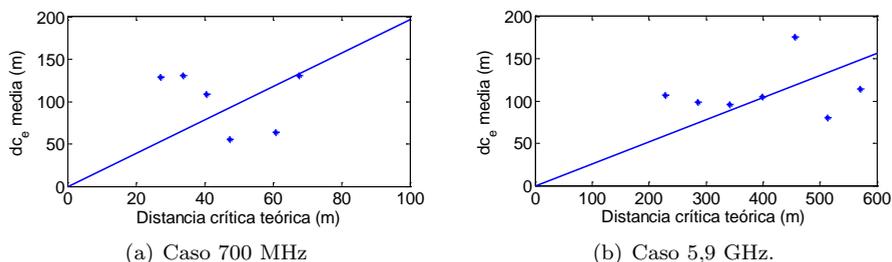


Figura 5.16: Relación entre la distancia crítica experimental media y la distancia crítica teórica.

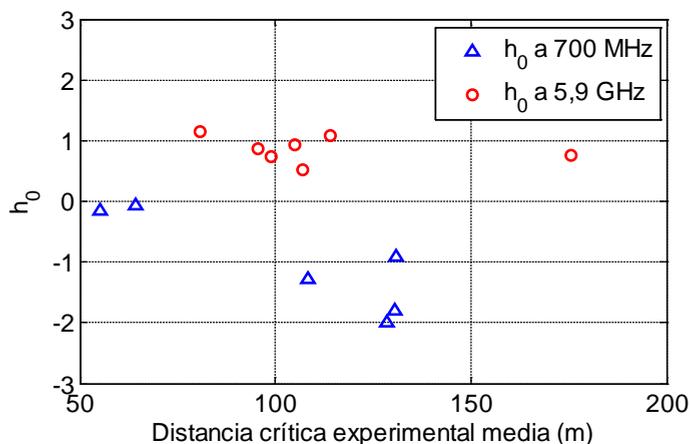


Figura 5.17: Constante de compensación de altura efectiva del terreno.

Se observa la tendencia que tiene h_0 de aumentar a medida que la altura de la antena del Tx es mayor para 700 MHz y 5,9 GHz, a excepción de $h_{Tx} = 5$ m., a 700 MHz y $h_{Tx} = 4$ m. y $h_{Tx} = 5$ m., a 5,9 GHz.

En la Tabla 5.11 se recopilan los valores de h_0 mostrados en la Fig. 5.17. Cabe destacar que el valor de $\bar{d}c_e = 252,59$ m. obtenido a 700 MHz, claramente difiere considerablemente del resto de valores de $\bar{d}c_e$, por lo que se correspondería con un punto impropio. Por tanto no se ha tenido en cuenta para el análisis de los resultados mostrados en dicha figura.

En [30] los autores proponen un valor de compensación que es función de la densidad de tráfico rodado, $h_0 = 0,5$ para una baja densidad de tráfico, $h_0 = 1$ para una densidad de tráfico moderada y $h_0 = 1,5$ para una alta densidad de tráfico. Mientras que en [34] los autores proponen una distancia

Tabla 5.11: Compensación de la altura efectiva del terreno, h_0 . Escenario urbano de alta densidad (A-D), de acuerdo con el valor de \overline{dc}_e .

Altura (cm)	Escenario urbano A-D					
	Frecuencia 700 MHz			Frecuencia 5,9 GHz		
	\overline{dc}_e (m)	dc_t (m)	h_0	\overline{dc}_e (m)	dc_t (m)	h_0
200	128,61	27,07	-1,9973	107,06	228,13	0,5264
250	130,43	33,83	-1,8000	98,94	285,17	0,7367
300	108,41	40,60	-1,2701	95,68	342,20	0,8771
350	55,09	47,37	-0,1619	104,98	399,23	0,9306
400	252,59	54,13	-2,6312	175,62	456,27	0,7608
450	64,16	60,90	-0,0581	80,68	513,30	1,1444
500	130,86	67,67	-0,9188	114,22	570,33	1,0796

crítica experimental distancia crítica experimental $dc_e = 100$ m., con la cual, teniendo los valores de $h_{Tx} = 1,51$ m. y $h_{Rx} = 1,93$ m. han proporcionado un valor de $h_0 = 0,57$.

De acuerdo con las Tablas 5.6 y 5.7 se presentan los resultados del modelo a dos pendientes solamente a 700 MHz, donde la \overline{dc}_e es igual a 239,77 m., lo que se correspondería con un punto impropio de acuerdo con nuestros resultados.

Por otra parte, en la Tabla 5.8 se presentan resultados del modelo a dos pendientes únicamente a 5,9 GHz, donde la \overline{dc}_e es igual a 379,88 m. para una altura del Tx igual a 3,68 m., mientras que la \overline{dc}_e es igual a 272,42 m. para una altura del Tx igual a 5,14 m.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras

6.1. Conclusiones

En esta sección se detallan las conclusiones derivadas de este trabajo de investigación. Se han agrupado en cuatro puntos, los cuales responden a los objetivos propuestos en la Tesis Doctoral.

- **Diseño e implementación de una sonda de canal.**

Se ha implementado una sonda de canal a 700 MHz y 5,9 GHz con el propósito de analizar las características del canal V2X. Asimismo, se ha planteado un balance de potencias para cada banda en frecuencias y para cada sistema V2V y V2I. Asimismo se ha desarrollado un proceso automatizado para la adquisición de las medidas. Dicho esto, nos ha permitido realizar una extensa campaña de medias en escenarios potenciales para comunicaciones vehiculares y las aplicaciones propuestas bajo el concepto ITS.

- **Planificación y desarrollo de una campaña de medidas.**

Se ha planificado una extensa campaña de medidas en escenarios vehiculares. La campaña ha ido enfocada a analizar el comportamiento de las pérdidas de propagación en escenarios V2V y V2I. Una campaña de medidas de esta magnitud requiere de mucho tiempo y suficientes recursos humanos, por lo que la campaña de medias se diseñó y realizó pensando en estudios posteriores relacionados con la selectividad en tiempo (*fading*) debido al efecto multicamino, así como el análisis y modelado de la

propagación en escenarios particulares, como son las intersecciones, donde las comunicaciones vehiculares juegan un importante papel desde el punto de vista de la seguridad vial.

■ Caracterización de las pérdidas de propagación en el canal V2V

Se ha llevado a cabo un análisis de las pérdidas de propagación, estableciendo un modelo lineal entre las pérdidas de propagación y el logaritmo de la distancia entre el transmisor y receptor. Se trata de un modelo sencillo, pero bastante preciso, que permite una fácil implementación en simuladores de redes vehiculares. Para el procesamiento de los registros de datos medidos en nuestra campaña de medidas se ha tomado como referencia los métodos de análisis basados en la fusión de registros, registros individuales y algoritmo de ventana deslizante. Como consecuencia de dicho estudio, para cada uno de los entornos se puede concluir lo siguiente:

1. Escenarios urbano de alta y baja densidad de tráfico: se han obtenido valores medios del exponente de pérdidas de 2,06 y 1,83 a 700 MHz. Mientras que a 5,9 GHz se han obtenidos valores medios del exponente de pérdidas de 1,77 y 1,70, los cuales concuerdan con valores del exponente de pérdidas de propagación 1,61, 1,68 y 1,83 presentados en [24], [29] y [61] a 5,9 GHz, respectivamente.
2. Escenario suburbano: se ha obtenido un valor medio del exponente de pérdidas de 2,78 a 700 MHz. Mientras que a 5,9 GHz el valor medio del exponente de pérdidas es de 1,96, el cual concuerda con valores del exponente de pérdidas de propagación 2,1-2,5, 1,61 y 1,59 presentados en [21], [24] y [29] a 5,9 GHz, respectivamente.
3. Escenario rural: se ha obtenido un valor medio del exponente de pérdidas de 2,92 a 700 MHz. Mientras que a 5,9 GHz el valor medio obtenido es de 1,72, el cual concuerda con el valor de 1,70 presentado en [24].
4. Escenario de autovía: se ha obtenido un valor medio del exponente de pérdidas de 2,58 a 700 MHz. A la frecuencia de 5,9 GHz el valor medido es de 2,06, el cual concuerda con los valores del exponente de pérdidas de propagación 1,77, 1,85 y 2,21 presentados en [29], [24] y [61] a 5,9 GHz, respectivamente.

Se observa que el exponente de pérdidas de propagación es mayor a 700 MHz que a 5,9 GHz para todos los escenarios de propagación. Asimismo, el mayor exponente de pérdidas de propagación aparece en entorno de autovía para 5,9 GHz y en escenario rural a 700 MHz. Es importante resaltar que no existen trabajos relacionados con la caracterización de las

pérdidas de propagación a 700 MHz para comunicaciones vehiculares con el propósito de comparar nuestros resultados.

Se han aplicado los métodos de análisis propuestos, comentados con anterioridad, para el procesado de los registros de datos medidos, clasificando los recorridos medidos bajo condiciones de propagación LOS y NLOS. Los valores del exponente de pérdidas de propagación oscilan desde 1,54 hasta 2,59 en LOS, y desde 2,18 hasta 3,43 en NLOS a 700 MHz y para el caso de 5,9 GHz oscilan entre 1,32 y 2,13 en LOS, y desde 1,49 hasta 2,53 en NLOS. Conviene destacar que de acuerdo con los resultados obtenidos, la distribución del exponente de pérdidas se encuentra sobre un rango de menor valor para el caso LOS que para el caso NLOS a 700 MHz y 5,9 GHz, como era de esperar. En este sentido se ha confirmado la necesidad de tener en cuenta dicha clasificación a la hora de proponer modelos de propagación más precisos.

Se ha comprobado que un exponente de pérdidas menor que 2 no necesariamente corresponde a condiciones de propagación mejores que en el espacio libre. Por lo general, los valores del exponente de pérdidas de propagación menores que 2 se encuentran relacionados con valores de L_0 mayores que 47,85 dB (valor de L_0^* en espacio libre, a 5,9 GHz para una distancia de separación Tx-Rx de 1 m. según Ec. (4.3)). Esto significa que aunque el valor del exponente de pérdidas es menor que 2, el total de las pérdidas de propagación es mayor que las pérdidas de propagación en condiciones de espacio libre.

■ **Caracterización de las pérdidas de propagación en el canal V2I**

En este tipo de canal se ha observado que el exponente de pérdidas de propagación no presenta una alta correlación con respecto a la altura a la que se encuentra la antena transmisora o punto de infraestructura dada la baja variación del mismo. Aunque, sí se ha observado un ligero decrecimiento en el valor del exponente de pérdidas a medida que aumenta la altura del Tx.

Dada la correlación que existe entre la distancia crítica experimental y la distancia crítica teórica para un modelo a dos pendientes se han propuesto valores de k iguales a 7,2958-7,8722 y 1,3564-1,0407 a 700 MHz y 5,9 GHz, respectivamente, para el modelo de distancia crítica teórica dado por la expresión $dc_t = kh_{Tx}h_{Rx}/\lambda_c$.

En la práctica, la distancia crítica está relacionada con las características de propagación del medio, por lo que algunos autores [30], [34], emplean una constante de compensación de altura efectiva del terreno, representada por h_0 (ver Ec. (2.25)), para modelar las diferentes condiciones de

propagación. En este sentido se han propuesto valores de h_0 que presentan una variación con respecto a la altura del Tx, los cuales oscilan entre $h = -0,5915$ y $h = -0,8432$ a 700 MHz, mientras que a 5,9 GHz oscilan desde $h = 0,6959$ hasta $h = 0,8664$, para alturas del Tx entre 2 m. y 5,5 m. Se observa la tendencia que tiene h_0 de disminuir a medida que la altura de la antena del Tx es mayor para el caso de 700 MHz, mientras que a 5,9 GHz la tendencia de h_0 es aumentar a medida que la altura de la antena del Tx es mayor.

Cabe resaltar que al considerar el análisis tomando un valor de distancia crítica experimental media \overline{dc}_e , para cada altura de la antena del Tx, los valores del parámetro h_0 presentados oscilan entre $h = -0,0581$ y $h = -0,8432$ a 700 MHz, mientras que a 5,9 GHz varían desde $h = -0,5264$ hasta $h = 1,1444$ a 5,9 GHz, para alturas del Tx entre 2 m. y 5 m. A diferencia del caso anterior se observa la tendencia que tiene h_0 de aumentar a medida que la altura de la antena del Tx es mayor para las dos bandas de frecuencia analizadas, a excepción de $h_{Tx} = 5$ m., a 700 MHz y $h_{Tx} = 4$ m. y $h_{Tx} = 5$ m., a 5,9 GHz.

6.2. Líneas futuras

Existen casos particulares de los escenarios de propagación en los que se ha de llevar a cabo una caracterización de canal vehicular en banda estrecha, en los cuales hemos realizado medidas y tenemos previsto continuar con su respectivo estudio. Asimismo, es interesante continuar explorando las características de propagación en la nueva banda de 700 MHz, asignada para aplicaciones ITS, ya que son significativamente diferentes a la banda de 5,9 GHz existente. A continuación se presentan los casos particulares a analizar.

- **Vías de doble sentido.** Se han realizado medidas en escenarios urbanos y rurales, en donde el Tx y Rx se dirigen en sentido contrario. En la Fig 6.1 se muestran varios casos de este tipo de situaciones.
- **Propagación en túneles.** Se han realizado medidas en túneles ubicados en entornos urbanos, donde en la mayoría de los casos existen dos carriles de circulación con una máxima velocidad de 50 km/h. En la Fig 6.2 se ilustran ejemplos de este tipo de escenario.
- **Parking.** Es otro de los escenarios importantes en la caracterización del canal de propagación vehicular, se ha decidido realizar las medidas en un parking ubicado en un escenario urbano, tratando de modelar condiciones LOS y NLOS, como se muestra en la Fig 6.3



(a) Entorno Urbano.



(b) Entorno Rural.

Figura 6.1: Entornos de comunicaciones en sentido contrario.



(a) Entrada al túnel.



(b) Túnel en un sólo sentido de circulación.

Figura 6.2: Túneles.



(a) Condiciones LOS.



(b) Condiciones NLOS.

Figura 6.3: Parking.

- **Intersecciones.** Son otro aspecto de propagación importante a estudiar, en los cuales también hemos realizado medidas en diferentes situaciones: i) ambos vehículos se van acercando hasta que coinciden en la intersección,

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

ver Fig. 6.4(a); ii) en los que ambos terminales se van separando, cada uno en su sentido correspondiente, tras su paso por el cruce, ver Fig. 6.4(b); iii) situaciones en las que uno se aleja y el otro se aproxima al cruce, ver Fig. 6.4(c); y por último iv) casos en los que el Tx y Rx se encuentren estacionados, ver Fig. 6.4(d).

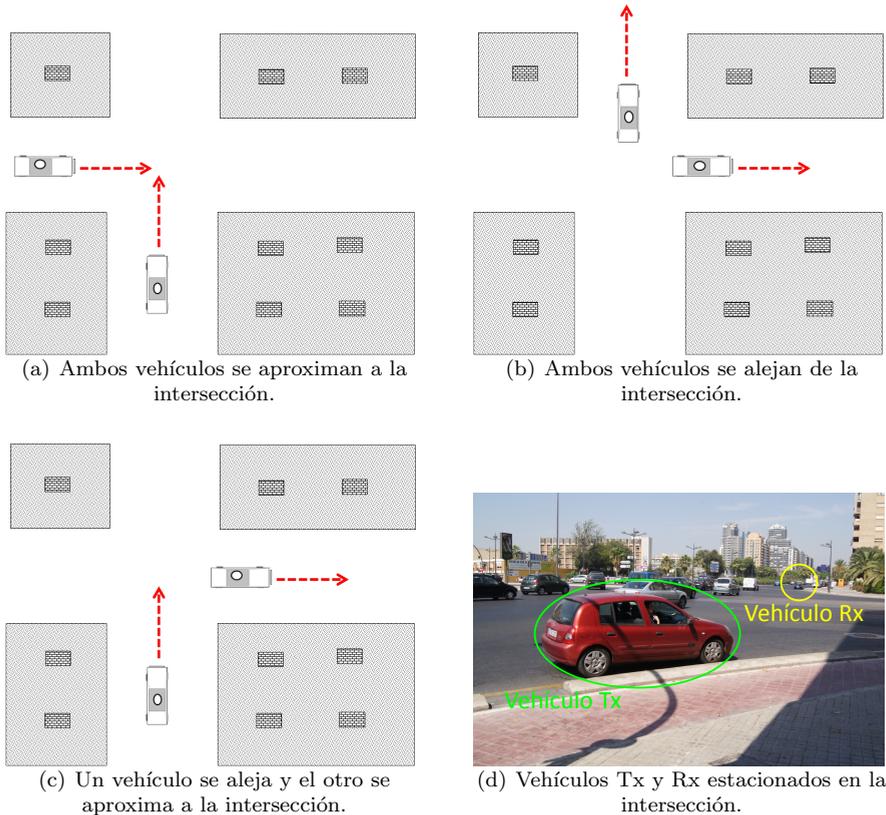


Figura 6.4: Intersecciones

- **Desvanecimiento a corto plazo.** Se hace necesario un análisis del comportamiento selectivo en tiempo del canal radio en escenarios vehiculares, dadas las variaciones del efecto multicamino debido a la gran velocidad de los vehículos Tx-Rx, como también la de los vehículos que se encuentran a su alrededor, lo cual hace que la variabilidad temporal en este escenario sea mas acusada que los tradicionales sistemas F2M.

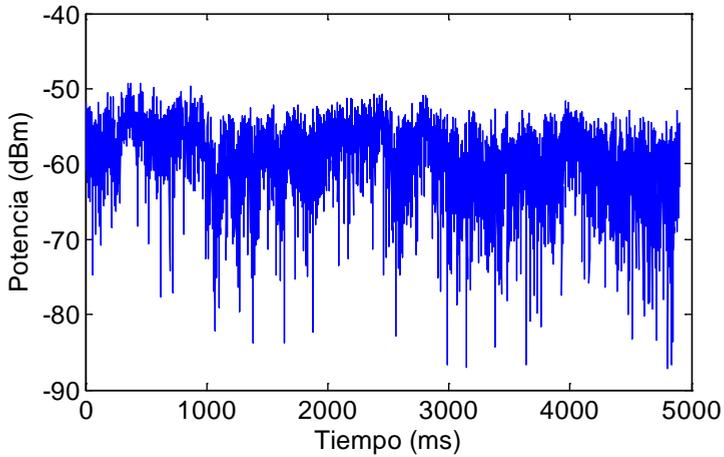


Figura 6.5: Traza para el análisis del desvanecimiento a corto plazo.

Por lo tanto, otro de los principales propósitos con el diseño de la sonda de canal y la posterior planificación y clasificación de la campaña de medidas es el de permitir un estudio de la variabilidad temporal de la señal recibida. Así pues las medidas realizadas permitirán evaluar el efecto de los desvanecimientos selectivos en tiempo, como también los efectos de dispersión en frecuencia debidos al Doppler. A manera de ejemplo, en la Fig. 6.5 se muestra el comportamiento de la potencia Rx en relación al tiempo para un registro con una traza de 5000 puntos.

Referencias

- [1] H. Suzuki, B. Gallagher, and H. Akatsuka, “Wireless communications for vehicle safety: Radio link performance and wireless connectivity methods,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 1, no. 4, pp. 4–16, 2006.
- [2] D. Jiang and L. Delgrossi, “IEEE 802.11 p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments,” in *Proc. IEEE Vehic. Technol. Conf., VTC Spring*, 2008, pp. 2036–2040.
- [3] D. Matolak and Q. Wu, “Vehicle-to-vehicle channels: Are we done yet?” in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*, 2009, pp. 1–6.
- [4] C.-X. Wang, X. Cheng, and D. I. Laurenson, “Vehicle-to-vehicle channel modeling and measurements: recent advances and future challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 96–103, 2009.
- [5] A. F. Molisch, F. Tufvesson, J. Karedal, and C. F. Mecklenbrauker, “A survey on vehicle-to-vehicle propagation channels,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 16, no. 6, pp. 12–22, 2009.
- [6] C. Mecklenbräuker, A. Molisch, J. Karedal, F. Tufvesson, A. Paier, L. Bernadó, T. Zemen, O. Klemp, and N. Czink, “Vehicular channel characterization and its implications for wireless system design and performance,” *Proceedings of the IEEE*, no. 99, pp. 1–24, 2011.
- [7] L. Rubio, J. Reig, and H. Fernández, *Propagation Aspects in Vehicular Networks, Vehicular Technologies*. Miguel Almeida (Ed.), InTech, 2011.
- [8] “Standard specification for telecommunications and information exchange between roadside and vehicle systems 5 GHz band dedicated short range communications (DSRC) medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications,” *ASTM E2213-03*, 2003.

REFERENCIAS

- [9] R. Sevlian, C. Chun, I. Tan, A. Bahai, and K. Laberteaux, "Channel characterization for 700 MHz DSRC vehicular communication," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2010, pp. 1–9, 2010.
- [10] S. Chen, A. M. Wyglinski, S. Pagadarai, R. Vuyyuru, and O. Altintas, "Feasibility analysis of vehicular dynamic spectrum access via queueing theory model," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 11, pp. 156–163, 2011.
- [11] H. Fernandez, L. Rubio Arjona, V. Rodrigo, and J. Reig, "Path loss characterization for vehicular communications at 700 MHz and 5.9 GHz under LOS and NLOS conditions," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 755–765, 2014.
- [12] J. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel. (Second Edition)*. Jhon Wiley & Sons, 2000.
- [13] P. Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels," *IEEE Trans. Commun. Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 360–393, 1963.
- [14] D. W. Matolak, "Channel modeling for vehicle-to-vehicle communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 5, pp. 76–83, 2008.
- [15] H. Fernandez, S. Avella, A. J. Campuzano, D. Balaguer, V. M. Rodrigo-Penarrocha, J. Reig, and L. Rubio, "A survey of channel measurement techniques and narrowband channel parameters for vehicular communications," in *Proc. IEEE Communications Conference COLCOM, Colombian*, 2012, pp. 1–6.
- [16] I. Sen and D. Matolak, "Vehicle-vehicle channel models for the 5 GHz band," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 235–245, 2008.
- [17] G. Acosta, K. Tokuda, and M. Ingram, "Measured joint doppler-delay power profiles for vehicle-to-vehicle communications at 2.4 GHz," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*, vol. 6, 2004, pp. 3813–3817.
- [18] Y. Ito, T. Taga, J. Muramatsu, and N. Suzuki, "Prediction of line-of-sight propagation loss in inter-vehicle communication environments," in *Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, 2007, pp. 1–5.
- [19] J. Maurer, T. Fugen, and W. Wiesbeck, "Narrow-band measurement and analysis of the inter- vehicle transmission channel at 5.2 GHz," in *Proc. IEEE 55th Vehic. Technol. Conf., VTC Spring*, vol. 3, 2002, pp. 1274–1278.

- [20] G. Acosta-Marum and M. Ingram, "Six time-and frequency-selective empirical channel models for vehicular wireless LANs," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 2, no. 4, pp. 4–11, 2007.
- [21] L. Cheng, B. Henty, D. Stancil, F. Bai, and P. Mudalige, "Mobile vehicle-to-vehicle narrow-band channel measurement and characterization of the 5.9 GHz dedicated short range communication (DSRC) frequency band," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 25, no. 8, pp. 1501–1516, 2007.
- [22] L. Cheng, B. Henty, R. Cooper, D. Stancil, and F. Bai, "Multi-path propagation measurements for vehicular networks at 5.9 GHz," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, 2008, pp. 1239–1244.
- [23] I. Tan, W. Tang, K. Laberteaux, and A. Bahai, "Measurement and analysis of wireless channel impairments in DSRC vehicular communications," in *Proc. IEEE International Conference on Communications, ICC*, 2008, pp. 4882–4888.
- [24] J. Kunisch and J. Pamp, "Wideband car-to-car radio channel measurements and model at 5.9 GHz," in *Proc. IEEE 68th Vehic. Technol. Conf., VTC Fall*, 2008, pp. 1–5.
- [25] A. Zajic, G. Stuber, T. Pratt, and S. Nguyen, "Wideband MIMO mobile-to-mobile channels: geometry-based statistical modeling with experimental verification," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 2, pp. 517–534, 2009.
- [26] A. Paier, J. Karedal, N. Czink, H. Hofstetter, C. Dumard, T. Zemen, F. Tufvesson, C. Mecklenbrauker, and A. Molisch, "First results from car-to-car and car-to-infrastructure radio channel measurements at 5.2 GHz," in *Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, 2007, pp. 1–5.
- [27] O. Renaudin, V. Kolmonen, P. Vainikainen, and C. Oestges, "Car-to-car channel models based on wideband MIMO measurements at 5.3 GHz," in *Proc. IEEE 3rd European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP*, 2009, pp. 635–639.
- [28] P. Paschalidis, M. Wisotzki, A. Kortke, W. Keusgen, and M. Peter, "A wideband channel sounder for car-to-car radio channel measurements at 5.7 GHz and results for an urban scenario," in *Proc. IEEE 68th Vehic. Technol. Conf., VTC Fall.*, 2008, pp. 1–5.
- [29] J. Karedal, N. Czink, A. Paier, F. Tufvesson, and A. Molisch, "Path loss modeling for vehicle-to-vehicle communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 323–328, 2011.

REFERENCIAS

- [30] Y. Bultitude and T. Rautiainen, "IST-4-027756 WINNER II D1. 1.2 V1. 0 WINNER II channel models part II." [Online]. Available: [http://www2.tu-ilmenau.de/nt/generic/paper_pdfs/Part %20II %20of %20D1.1.2.pdf](http://www2.tu-ilmenau.de/nt/generic/paper_pdfs/Part%20II%20of%20D1.1.2.pdf)
- [31] F. P. Fontan and P. M. Espineira, *Modelling the Wireless Propagation Channel: A Simulation Approach with MATLAB*. John Wiley & Sons, 2008.
- [32] E. Green and M. Hata, "Microcellular propagation measurements in an urban environment," in *Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1991, pp. 324–328.
- [33] H. Xia, H. Bertoni, L. Maciel, A. Lindsay-Stewart, and R. Rowe, "Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal communications," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 41, no. 10, pp. 1439–1447, 1993.
- [34] M. Emmelmann, B. Bochow, and C. Kellum, *Vehicular Networking: Automotive Applications and Beyond*. John Wiley & Sons, 2010.
- [35] L. Cheng, B. Henty, F. Bai, and D. Stancil, "Highway and rural propagation channel modeling for vehicle-to-vehicle communications at 5.9 GHz," in *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, AP-S*, 2008, pp. 1–4.
- [36] S. A. Hosseini Tabatabaei, M. Fleury, N. N. Qadri, and M. Ghanbari, "Improving propagation modeling in urban environments for vehicular ad hoc networks," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 12, no. 3, pp. 705–716, 2011.
- [37] S. Sai, E. Niwa, K. Mase, M. Nishibori, J. Inoue, M. Obuchi, T. Harada, H. Ito, K. Mizutani, and M. Kizu, "Field evaluation of UHF radio propagation for an ITS safety system in an urban environment," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 120–127, 2009.
- [38] A. Akki and F. Haber, "A statistical model of mobile-to-mobile land communication channel," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 35, no. 1, pp. 2–7, 1986.
- [39] H. Fernández, D. Balaguer, X. Part, J. Reig and L. Rubio, "Aspectos sobre la variabilidad temporal y dispersión en frecuencia del canal radio para comunicaciones vehiculares," in *Proc. Simposium Nacional de la URSI*, 2011.
- [40] I. Ryzhik, A. Jeffrey, and D. Zwillinger, *Table of Integrals, Series and Products*. Academic Press, 2007.

- [41] R. Clarke, "A statistical theory of mobile-radio reception," *J. Bell Syst. Tech.*, vol. 47, no. 6, pp. 957–1000, 1968.
- [42] C. W. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. Jhon Wiley & Sons, 1974.
- [43] L.-C. Wang, W.-C. Liu, and Y.-H. Cheng, "Statistical analysis of a mobile-to-mobile rician fading channel model," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 32–38, 2009.
- [44] C. Patel, S. Stuber, and T. Pratt, "Simulation of rayleigh faded mobile-to-mobile communication channels," in *Proc. IEEE 58th Vehic. Technol. Conf., VTC Fall*, vol. 1, 2003, pp. 163–167.
- [45] M. Austin and G. Stuber, "Velocity adaptive handoff algorithms for micro-cellular systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 549–561, 1994.
- [46] J. Salz and J. Winters, "Effect of fading correlation on adaptive arrays in digital mobile radio," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 4, pp. 1049–1057, 1994.
- [47] A. Abdi, J. Barger, and M. Kaveh, "A parametric model for the distribution of the angle of arrival and the associated correlation function and power spectrum at the mobile station," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 51, no. 3, pp. 425–434, 2002.
- [48] Q. Spencer, M. Rice, B. Jeffs, and M. Jensen, "A statistical model for angle of arrival in indoor multipath propagation," in *Proc. IEEE 47th Vehic. Technol. Conf., VTC Spring*, vol. 3, 1997, pp. 1415–1419.
- [49] K. Anim-Appiah, "Complex envelope correlations for non-isotropic scattering," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 9, pp. 918–919, 1998.
- [50] Y. Zheng, "A non-isotropic model for mobile-to-mobile fading channel simulations," in *Proc. IEEE Military Communications Conference, MIL-COM*, 2006, pp. 1–7.
- [51] L. Cheng, F. Bai, and D. Stancil, "A new geometrical channel model for vehicle-to-vehicle communications," in *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, AP-S*, 2009, pp. 1–4.
- [52] T. Jiang, H.-H. Chen, H.-C. Wu, and Y. Yi, "Channel modeling and inter-carrier interference analysis for V2V communication systems in frequency-dispersive channels," *Mobile Networks and Applications*, vol. 15, pp. 4–12, 2010.

REFERENCIAS

- [53] L. Cheng, B. Henty, F. Bai, and D. Stancil, “Doppler spread and coherence time of rural and highway vehicle-to-vehicle channels at 5.9 GHz,” in *Proc. IEEE Global Telecommunication Conference, GLOBECOM*, 2008, pp. 1–6.
- [54] A. Molisch, *Wireless Communications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [55] G. Dib, “Vehicle-to-vehicle channel simulation in a network simulator,” Ph.D. dissertation, Carnegie Mellon University, 2009.
- [56] A. Campuzano, H. Fernández, D. Balaguer, V. Rodrigo, J. Reig and L. Rubio, “Caracterización experimental en banda estrecha del canal radio vehicular-to-vehicular (V2V) a 5.9 GHz,” in *Proc. Simposium Nacional de la URSI*, 2012.
- [57] D. W. Matolak, “V2V communication channels: State of knowledge, new results, and what’s next,” in *Communication Technologies for Vehicles*. Springer, 2013, pp. 1–21.
- [58] H. Fernández, V. Rodrigo, J. Reig and L. Rubio, “Caracterización de las pérdidas de propagación en escenarios vehiculares bajo condiciones LOS y NLOS a 700 MHz y 5.9 GHz,” in *Proc. Simposium Nacional de la URSI*, 2013.
- [59] H. Fernández, V. Rodrigo, L. Rubio and J. Reig, “Path loss characterization in vehicular environments under LOS and NLOS conditions at 5.9 GHz,” in *Proc. 8th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP. The Hague*, 2014.
- [60] H. Fernández, L. Rubio, J. Reig, V. M. Rodrigo-Peñarrocha, and A. Valero, “Path loss modeling for vehicular system performance and communications protocols evaluation,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 18, no. 6, pp. 755–765, 2013.
- [61] P. Paschalidis, K. Mahler, A. Kortke, M. Peter, and W. Keusgen, “Path-loss and multipath power decay of the wideband car-to-car channel at 5.7 GHz,” in *Proc. IEEE 73rd Vehic. Technol. Conf., VTC Spring*, 2011, pp. 1–5.
- [62] K. Konstantinou, S. Kang, and C. Tzaras, “A measurement-based model for mobile-to-mobile UMTS links,” in *Proc. IEEE 65th Vehic. Technol. Conf., VTC Spring*, 2007, pp. 529–533.