



Universidad de Oviedo

Redes Vehiculares Aplicadas a la Movilidad
Inteligente y Sostenibilidad Ambiental en
Entornos de Ciudades Inteligentes

José Antonio Sánchez Sánchez

Tesis Doctoral

2017

**RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL**

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: Redes Vehiculares Aplicadas a la Movilidad Inteligente y Sostenibilidad Ambiental en Entornos de Ciudades Inteligentes	Inglés: Vehicular Networks Applied to Intelligent Mobility and Environmental Sustainability in Smart Cities Environments
2.- Autor	
Nombre: José Antonio Sánchez Sánchez	DNI/Pasaporte/NIE: -T
Programa de Doctorado: Informática	
Órgano responsable: Centro Internacional de Postgrado / Departamento de Informática	

RESUMEN (en español)

En los últimos años, la sociedad está experimentando una gran revolución tecnológica que, junto con la aparición de las tecnologías inalámbricas y dispositivos cada vez más pequeños, está suponiendo un gran impulso en la creación de nuevos servicios y aplicaciones para los ciudadanos. Dentro de esta revolución, las redes de comunicaciones han servido para interconectar personas y dispositivos consiguiendo forjar la *Sociedad de Red* actual.

Hace pocos años apareció el término de Ciudad Inteligente (Smart City). Este concepto se fundamenta en la propuesta de soluciones innovadoras que doten a una ciudad de servicios destinados a facilitar la vida de sus habitantes y que favorezcan el desarrollo de ciudad como conjunto. En este ámbito, los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), han supuesto un relevante auge en el desarrollo de nuevas propuestas tecnológicas aplicadas al mundo del transporte. Dentro de los ITS, surgió el concepto de *redes vehiculares (Vehicular Ad-hoc NETWORKS - VANET)*. Este tipo de red inalámbrica es capaz de comunicar vehículos e infraestructura para proveer determinados servicios. Actualmente, dichas redes están en el punto de mira del desarrollo tecnológico debido al previsible número de aplicaciones y servicios que pueden aportar al mundo de la conducción y a la sociedad en general.

Una herramienta fundamental para poder estudiar el comportamiento de las redes vehiculares es la simulación. Ante la problemática ofrecida por el alto coste de los dispositivos que implementan estándares dedicados a las redes VANET, como el IEEE 802.11p, y los riesgos de seguridad vial que supone un despliegue por ciudad de este tipo de red, la simulación se hace imprescindible para poder abordar la creación e implementación de nuevas soluciones. En ese sentido, esta tesis doctoral realiza una profunda revisión de las herramientas existentes utilizadas para la simulación de redes vehiculares, proponiendo un caso de estudio aplicado sobre el intercambio de vídeo en este tipo de entornos. Como resultado, se presenta la integración de tres simuladores para llevar a cabo

el intercambio de vídeo, consiguiendo una tasa aceptable de información transmitida por los vehículos y evaluando la viabilidad de la propuesta.

La movilidad es uno de los aspectos más destacados en el despliegue de las redes vehiculares. En este sentido, una de las principales contribuciones de esta tesis doctoral es la creación de un plan de movilidad inteligente basado en lógica difusa y en comunicaciones vehiculares que es capaz de determinar cuándo se produce un atasco en ciudad para que los vehículos tomen rutas alternativas. Los resultados de esta propuesta consiguieron alcanzar unas reducciones de emisiones contaminantes de hasta un 12,27%, obteniendo una mejora de la sostenibilidad ambiental en ciudad mediante la toma de rutas alternativas por parte de los vehículos para alcanzar su destino.

Uno de los problemas que plantean los estudios simulados, es la obtención de resultados veraces. Debido a la propia simulación, se pueden obtener conclusiones erróneas que hacen necesario un despliegue real para confirmar que los datos obtenidos en la simulación son correctos y representativos. Atendiendo a la problemática del alto coste que conlleva este tipo de despliegues, uno de los objetivos planteados por la tesis doctoral, fue el de llevar a cabo un despliegue real mediante el uso de tecnologías accesibles para los ciudadanos. En este punto, se decidió desarrollar una aplicación que hace uso de *Wi-Fi Direct* (tecnología disponible en la mayoría de teléfonos inteligentes actuales), para la detección de posibles atascos o retenciones en ciudad y que fuera capaz de comunicarse con otros dispositivos. Las pruebas reales se llevaron a cabo con dos vehículos que incorporaban la aplicación. Los resultados de este tipo de evaluación fueron satisfactorios en cuanto a la posibilidad existente de realizar comunicaciones vehiculares usando tecnologías accesibles para la población, exponiendo un claro ejemplo de un sistema que puede ayudar a mejorar la movilidad en ciudad.

Una vez llevado a cabo el estudio real, surgió la problemática asociada a la usabilidad de dispositivos embarcados en vehículos que ofrecen servicios de información dentro de las redes vehiculares. A tal efecto, en esta tesis doctoral se propone la evaluación de dos tipos de sistemas que proporcionan información al conductor. En primer lugar, se evaluaron sistemas con pantallas de tipo HDD (*Head-Down Display*), que son dispositivos con pantallas opacas (convencionales). Por otro lado, se estudió una posible solución a los inconvenientes planteados por este tipo de pantallas en la que es necesario apartar la vista de la carretera para prestarles atención. Por ese motivo, se decidió incorporar un dispositivo de tipo HUD (*Head-Up Display*) que contiene una pantalla transparente y puede ser ubicado en el campo visual de conducción para poder ver sobre él la información relativa al contexto en el que el vehículo se mueve. Los resultados obtenidos son alentadores, pudiendo comprobar la gran aceptación y usabilidad que esta clase de sistemas de visualización de información tiene entre los usuarios.

Siguiendo la línea de la sostenibilidad ambiental, desde el grupo de



investigación en el que se desarrolla esta tesis doctoral, se propusieron las redes de vehículos móviles como solución para la medición de la contaminación. Llegados a este punto, se desplegó un servicio de monitorización ambiental incorporado en transportes públicos (autobuses, recogida de residuos, etc.), que fueron capaces de medir la contaminación en ciudad. El principal problema que se planteó fue el cómo representar ese tipo de información a los ciudadanos para que fuera comprensible. Como consecuencia, se decidió llevar a cabo una prueba subjetiva sobre métodos para representar esta clase de información. Los resultados nos permitieron conocer cuáles eran las representaciones en materia de contaminación más adecuadas, así como los dispositivos sobre los que visualizarlas y los tipos de datos que más interesaban a los diferentes grupos de usuarios.

Como vemos, la presente tesis doctoral, propone un estudio amplio de los entornos de redes vehiculares y de su inclusión dentro de un entorno de Smart City, enfatizando la temática sobre la movilidad inteligente y la sostenibilidad ambiental, sin olvidar la tecnología necesaria para la implantación real de nuevas soluciones enfocadas siempre a la mejora del transporte en ciudad y la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.

Palabras Clave: Redes Vehiculares, Movilidad Inteligente, Sostenibilidad Ambiental, Smart City.

RESUMEN (en Inglés)

In recent years, the society is experiencing a great technological revolution which, together with the emergence of wireless technologies and smaller devices, is leading to a great impulse in the creation of new services and applications for citizens. Within this revolution, communications networks have served to interconnect people and devices by forging the current Network Society.

A few years ago, the term Smart City appeared. This concept is based on the proposal of new solutions that provide a city with services designed to improve the lives of citizens and favor the development of a city as a whole. In this area, the Intelligent Transport Systems (ITS) have led to an important rise in the development of new technological proposals applied to the world of transport. Within the ITS, the concept of vehicular networks arose (Vehicular Ad-hoc NETWORKS - VANET). This type of wireless network is capable of communicating vehicles and infrastructure to provide certain services. At present, such networks are in the sights of technological developments due to the expected number of applications and services that can contribute to the world of driving and society in general.

Simulation is a fundamental tool in the study of the behavior of vehicular networks. In view of the high cost of devices that implement dedicated standards for VANET networks, such as IEEE 802.11p, and the road safety risks involved in the deployment of this type of network, simulation becomes essential for the creation and implementation of new solutions. In this sense, this PhD Thesis performs a thorough review of the existing tools used for the simulation of vehicular networks, proposing a case study applied on the exchange of video in this type of environments. As a result, the integration of three simulators to carry out the video exchange is presented, obtaining an acceptable rate of information transmitted by the vehicles and evaluating the feasibility of the proposal.

The mobility is one of the most important aspects in the deployment of vehicular networks. In this sense, one of the main contributions of this PhD Thesis is the creation of a smart mobility plan based on fuzzy logic and vehicular communications which is able to determine when a traffic jam occurs in the city, allowing vehicles to adopt alternative routes. The results of this proposal achieve a reduction of pollutant emissions of up to 12.27%, leading to an improvement of environmental sustainability in the city through the adoption by vehicles of alternative routes in order to reach their destination.

One of the problems posed by simulated studies is the achievement of truthful results. Due to the simulation, erroneous conclusions can be drawn which require a real deployment to confirm that the data obtained in the simulation are correct and representative. Considering the high cost of this type of deployment, one of the objectives of the PhD Thesis was to carry out a real deployment through the use of technologies accessible to citizens. At this point, it was decided to develop an application that uses Wi-Fi Direct (technology available in the majority of current smartphones), to detect possible traffic jams or retentions in the city and capable of communicating with other devices. The actual tests were carried out with two vehicles that incorporated the application. The results of this type of evaluation were satisfactory in terms of the existing possibility of carrying out vehicular communications using technologies accessible to the general public, giving a clear example of a system that can help improve mobility in the city.

Once the actual study was carried out, the problem arose about the usability of devices on vehicles that provide information services in the vehicular networks. For this purpose, this PhD Thesis proposes the evaluation of two types of systems that provide information to the driver. First, systems with HDD (Head-Down Display) type screens, which are devices with opaque (conventional) screens, were evaluated. A possible solution to the problem posed by this type of screens was also studied, as it is necessary to look away from the road in order to see the screen. For this reason, it was decided to incorporate a HUD (Head-Up Display) device that contains a transparent screen and can be located in the visual field of driving in order to be able to view information about the context in which the vehicle is moving. The results obtained are encouraging and verify



the great acceptance and usability that this sort of systems of information visualization has among users.

In the line of environmental sustainability, it was proposed by the research group in which this thesis is developed that the networks of mobile vehicles could be a possible solution for the measurement of environmental pollution. Accordingly, an environmental monitoring service was installed in public transport (buses, waste collection vehicles, etc.), capable of measuring environmental pollution in the city. The main problem that we faced was how to represent this kind of information to make it understandable for the general public. For this reason, it was decided to carry out a subjective test on methods to represent information of this type. The results revealed the most appropriate representations of pollution, as well as the devices on which to visualize them and the types of data of most interest to the different groups of users.

As we can see, this PhD Thesis proposes an extensive study on vehicle network environments and their inclusion in a Smart City environment, emphasizing the theme of smart mobility and environmental sustainability, without forgetting the technology necessary for the real implementation of new solutions, with the focus firmly on both improving transport in the city and the quality of life of citizens.

Keywords: Vehicular Networks, Smart Mobility, Environmental Sustainability, Smart City.

Idioma	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Presentación como		
Compendio de publicaciones	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Justificación

<lugar> <fecha>

Presidente de la Comisión Académica del Programa de Doctorado/Director de Departamento

Fdo.:

Contra la presente Resolución, podrá interponer recurso de alzada ante el Rectorado, en el plazo de un mes, a partir del día siguiente al de la presente notificación, de conformidad con el art. 122 de la Ley 39/2015, de 1 de octubre, de Procedimiento Administrativo Común de las Administraciones Públicas

SR. _____
(Doctorando, Director de la Tesis Doctoral y Sr. Director del Centro Internacional de Postgrado)



Universidad de Oviedo

Departamento de Informática

Área de Ingeniería Telemática

**Redes Vehiculares Aplicadas a la Movilidad
Inteligente y Sostenibilidad Ambiental en Entornos
de Ciudades Inteligentes**

Directores

Dr. David Melendi Palacio - Dra. Laura Pozueco Álvarez

Doctorando

D. José Antonio Sánchez Sánchez

2017

Agradecimientos

La presente tesis doctoral culmina una de las etapas más importantes de mi vida. Son muchas las personas a las que quisiera agradecer su apoyo incondicional en todos los sentidos. Pido disculpas de antemano por si, debido a mi acentuado despiste, olvido mencionar a alguna persona que seguro ha sido importante para mí.

En primer lugar, me gustaría agradecer la dirección y seguimiento personal que han efectuado sobre mí los profesores, ya casi amigos, con los que he compartido estos últimos años. En especial, a David Melendi, director de la presente tesis doctoral que se volcó en mí desde el primer momento, guiándome y ayudándome en este proceso, algunas veces, tan complicado.

No puedo dejar de mencionar la labor de apoyo incondicional de mi familia y muy especialmente de mis padres; Antonio y María Jesús, sin su gran esfuerzo y ánimo habría sido imposible el poder llegar a conseguir mis metas.

Estoy y estaré eternamente agradecido a una persona muy especial para mí, Lorena, ella ha sido mi apoyo, guía y sustento en los momentos más difíciles, la persona que me ha permitido seguir adelante y en la que he podido confiar siempre.

Querría dedicar mi penúltimo párrafo a mencionar a las instituciones que me han acompañado en este largo viaje formativo que, mediante la presentación de este documento, quedará cerrado. A la Universidad de Murcia, por ser la primera universidad en formarme en temas relacionados con la Informática y la Telemática. A la Universidad de Castilla-La Mancha, que me permitió ampliar mis conocimientos en este apasionante mundo y por último a la Universidad de Oviedo por brindarme la oportunidad de completar mi formación académica y personal.

Por último, me gustaría agradecer el apoyo de mis “compañeros de viaje” a lo largo de todo este tiempo, especialmente a mis compañeros de laboratorio con los que he compartido los últimos años y a las personas que me han prestado, en mayor o menor medida, su ayuda para que pueda llegar a ser quien soy.

¡Gracias!

Índice General

Índice General	III
Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas.....	XI
Capítulo 1	1
1 Introducción.....	1
1.1 Introducción a las Ciudades Inteligentes (Smart Cities).....	2
1.1.1. Bloques Temáticos de una Smart City	4
1.2 Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS).....	7
1.3 Redes Vehiculares	8
1.3.1. Elementos de las Redes Vehiculares.....	9
1.3.2. Tipos de Comunicación dentro de una Red Vehicular	9
1.3.3. Integración de Redes Vehiculares en los Entornos de Smart Cities	10
1.4 Motivación de la Tesis Doctoral.....	11
1.5 Objetivos de la Tesis Doctoral.....	12
1.5.1. Desarrollar planes de movilidad inteligente en entornos urbanos	13
1.5.2. Creación de aplicaciones como soporte a comunicaciones vehiculares mediante el uso de estándares comerciales para la creación de planes de movilidad	14
1.5.3. Estudiar las posibilidades existentes para la reducción de la contaminación ambiental en ciudad	14
1.5.4. Analizar la usabilidad de dispositivos de abordó del vehículo para la visualización de información.....	14
1.6 Principales Aportaciones	15
1.6.1. Revisión de simulación en entornos de Redes VANET y caso de estudio sobre transmisión de datos de vídeo bajo el estándar H.265	15
1.6.2. Creación de planes de movilidad inteligente aplicando metodologías de lógica difusa y comunicaciones vehiculares	15
1.6.3. Aplicación de Wi-Fi Direct como tecnología accesible para su uso en comunicaciones vehiculares relacionadas con servicios de movilidad inteligente en ciudad	16
1.6.4. Realización de estudios de Usabilidad e Interacción con dispositivos embarcados en el vehículo.....	16
1.6.5. Revisión de redes de monitorización ambiental en ciudad y caso de estudio sobre representación de información.....	17
1.7 Organización del Documento	17

1.8	Publicaciones Derivadas de la Tesis Doctoral	18
1.8.1.	Artículos en Revistas	19
1.8.2.	Artículos en Congresos	22
Capítulo 2.....		25
2	Marco Teórico.....	25
2.1	Estandarización de las Redes Vehiculares	25
2.2	Proyectos Relacionados con Redes Vehiculares.....	29
2.3	Aplicaciones relacionadas con Redes Vehiculares	32
2.3.1.	Aplicaciones de Seguridad	32
2.3.2.	Aplicaciones Comerciales	34
2.3.3.	Aplicaciones para la Mejora del Confort	34
2.3.4.	Aplicaciones Productivas	35
Capítulo 3.....		39
3	IEEE 802.11p y Simulación de Redes Vehiculares	39
3.1	Estándar IEEE 802.11p	40
3.1.1.	El Estándar 802.11	40
3.1.2.	DSRC y 802.11p.....	40
3.1.3.	Capas de Operación de 802.11p	41
3.1.4.	Descripción del estándar IEEE 802.11p.....	43
3.2	Simulación de Redes Vehiculares	45
3.2.1.	Introducción a la Simulación en VANETs.....	45
3.2.2.	Modelos de Movilidad y Tipos de Simuladores.....	46
3.2.3.	Herramientas de Simulación en Redes Vehiculares.....	50
3.2.4.	Comparativa de Simuladores.....	56
3.3	Caso de Estudio: Aplicación de Simulación para el Intercambio de Vídeo bajo el Estándar H.265 (HEVC) Usando Redes Vehiculares 802.11p.....	58
3.3.1.	Introducción.....	58
3.3.2.	Integración de los Simuladores y Puesta en Marcha.....	59
3.3.3.	Evaluación del Intercambio de Vídeo H.265 en una Red IEEE 802.11p.....	61
3.3.4.	Análisis y Discusión de Resultados.....	64
3.3.5.	Conclusiones	68
3.4	Contribuciones del Capítulo.....	68
Capítulo 4.....		71
4	Movilidad Inteligente en Redes Vehiculares	71

4.1	Sistemas Colaborativos y Movilidad Inteligente en Redes Vehiculares	72
4.2	Caso de Estudio sobre Movilidad Inteligente: Integración de un sistema para el control del tráfico aplicando lógica difusa y comunicaciones vehiculares	74
4.2.1.	Diseño del Sistema Colaborativo para la Movilidad Inteligente	75
4.2.2.	Entorno de Simulación.....	79
4.2.3.	Resultados y Discusión	83
4.2.4.	Conclusiones	90
4.3	Caso de Estudio: Wi-Fi Direct como Estándar aplicado a Comunicaciones Vehiculares	91
4.3.1.	Introducción a Wi-Fi Direct.....	92
4.3.2.	Descripción del Sistema de Comunicaciones Vehiculares Basado en Wi-Fi Direct	93
4.3.3.	Caso de Estudio Controlado.....	97
4.3.4.	Caso de Estudio Real	99
4.3.5.	Discusión de Viabilidad de la Propuesta	100
4.3.6.	Conclusiones	103
4.4	Contribuciones del Capítulo	104
Capítulo 5	109
5	Usabilidad de Dispositivos Embarcados en Entornos de Redes Vehiculares	109
5.1	Dispositivos de Representación de Información	110
5.2	Caso de Estudio: Impacto de dispositivos de recomendación abordó para la mejora de la conducción eficiente en ciudad.....	112
5.2.1.	Introducción	112
5.2.2.	Descripción del Sistema de Recomendación	113
5.2.3.	Evaluación del Sistema de Recomendación	114
5.2.4.	Análisis de Resultados	116
5.2.5.	Conclusiones	124
5.3	Caso de Estudio: Aplicación de dispositivos de representación de información de tipo HUD en entornos vehiculares reales	124
5.3.1.	Introducción	125
5.3.2.	Diseño del Sistema de Representación de Información.....	126
5.3.3.	Diseño de los Experimentos.....	129
5.3.4.	Discusión de Resultados	138
5.3.5.	Conclusiones	147
5.4	Contribuciones del Capítulo	149

Capítulo 6.....	153
6 Uso de Redes Vehiculares para la mejora de la Sostenibilidad Ambiental	153
6.1 Problemática Actual sobre Medición de Información Ambiental en Ciudad ...	154
6.2 Caso de Estudio sobre Sostenibilidad Ambiental en Ciudades - Representación de Información	156
6.2.1. Descripción de los Experimentos	156
6.2.2. Análisis de Resultados y Discusión.....	166
6.2.3. Conclusiones	172
6.3 Contribuciones del Capítulo.....	173
Capítulo 7.....	177
7 Conclusiones y Trabajos Futuros.....	177
7.1 Conclusiones Generales	177
7.2 Trabajos Futuros	182
Referencias.....	189
Apéndice A: Glosario de Acrónimos	201

Índice de Figuras

Figura 1. Pila de Protocolos WAVE.....	27
Figura 2. Principales Arquitecturas en Redes Vehiculares [50].....	29
Figura 3. Visión no exhaustiva de los proyectos y eventos relacionados con las redes VANET [51].....	30
Figura 4. Notificación de Situación de Emergencia [60].....	33
Figura 5. Clasificación de Canales [70].....	44
Figura 6. Simuladores Aislados.....	48
Figura 7. Simuladores Integrados.....	49
Figura 8. Simuladores Híbridos.....	50
Figura 9. Integración Básica de los Simuladores.....	54
Figura 10. Diagrama de Comunicación para la Integración de los Simuladores Empleados.....	59
Figura 11. Módulo Nic802.11p.NED.....	60
Figura 12. Representación de mapa real sobre simulador SUMO con indicación de ruta seguida por los vehículos.....	61
Figura 13. Inicio de simulación en SUMO con 2 vehículos.....	63
Figura 14. Inicio de simulación en SUMO con 10 vehículos.....	64
Figura 15. Tiempo de ejecución frente al porcentaje de paquetes perdidos en el caso de 2 vehículos.....	65
Figura 16. Vehículos frente al porcentaje de paquetes perdidos promedio en el caso de 2 vehículos.....	65
Figura 17. Vehículos frente al porcentaje de paquetes perdidos promedio en el caso de 10 vehículos.....	66
Figura 18. Tiempo de ejecución frente al porcentaje de paquetes perdidos en el caso de 10 vehículos.....	67
Figura 19. Vehículos frente al porcentaje de paquetes perdidos promedio en el caso de 20 vehículos.....	67
Figura 20. Sistema de inferencia de lógica difusa con el motor de inferencia incluido (reglas y el agregador).....	76
Figura 21. Función de Pertenencia - Velocidad.....	76
Figura 22. Función de Pertenencia - Tiempo.....	76
Figura 23. Función de Pertenencia - Nivel de Tráfico.....	77
Figura 24. Escenario 1 - Centro de la Ciudad de Gijón/Xixón / Escenario 2 - Periferia de la Ciudad de Gijón/Xixón.....	80
Figura 25. Vista de simulación en Tkenv.....	82
Figura 26. Extracto de la simulación en SUMO-GUI para la comunicación entre nodos.....	83
Figura 27. Emisiones de CO ₂ en el escenario 2 para la tasa de creación de vehículos de 1v/s.....	89
Figura 28. Pantallas de Información - (a) Pantalla de Datos Generales - (b) Pantalla de Datos con Representación de Eventos en Mapa.....	94
Figura 29. Aplicación desplegada sobre el dispositivo HUD en un entorno real de pruebas.....	94

Figura 30. Esquema de Funcionamiento de Comunicaciones	96
Figura 31. Escenario de pruebas para el caso de estudio controlado.....	97
Figura 32. Área aproximada real del escenario para la evaluación de la prueba de viabilidad del sistema en la ciudad de Gijón	99
Figura 33. Ejemplo de Intercambio de Información para el Caso de Comunicaciones I2I con una distancia de 50 metros	100
Figura 34. Ejemplo de intercambio de información en el caso de comunicación V2I a velocidad de 30 Km/h	102
Figura 35. Detección real de un evento de tráfico lento	102
Figura 36. Conexión a nodo no deseado en escenario real	103
Figura 37. Ejemplo real de dispositivos de información en el interior del vehículo	110
Figura 38. Simulador de Conducción con dispositivos de tipo HUD y HDD [129]	111
Figura 39. Asistente de Conducción #1 - (a) Situación Eficiente, (b) Situación Ineficiente	113
Figura 40. Asistente de Conducción #2	114
Figura 41. Tiempo medio de respuesta para grupos de usuarios según la edad (Escenario #1)	118
Figura 42. Tiempo medio en seguir las recomendaciones en función del intervalo de duración de las rutas (Escenario #1)	119
Figura 43. Tiempo medio en seguir las recomendaciones en función de la hora del día (Escenario #1)	120
Figura 44. Tiempo medio en seguir las recomendaciones en función de la recomendación de cambio de marcha efectuada por el sistema (Escenario #1)	120
Figura 45. Tiempo medio en seguir las recomendaciones en función del intervalo de duración de las rutas (Escenario #2)	122
Figura 46. Tiempo medio en seguir las recomendaciones en función de la hora del día (Escenario #2)	123
Figura 47. Tiempo medio en seguir las recomendaciones en función de la recomendación de cambio de marcha efectuada por el sistema (Escenario #2)	123
Figura 48. Diseño General del Sistema.....	126
Figura 49. Dispositivo recPOP embarcado en el vehículo	127
Figura 50. Escenario Real usado en los Experimentos	129
Figura 51. Aplicación CATED en un Entorno de Conducción Real	132
Figura 52. HUD (izquierda) vs. HDD (derecha).....	133
Figura 53. Aplicaciones de Navegación GPS (Google Map (izquierda) y HUDWAY (derecha)) corriendo en una prueba real sobre el dispositivo HUD.....	134
Figura 54. Google Now Launcher (comandos de voz predefinidos (izquierda)) y Voice Access (interacción numérica (derecha)).....	136
Figura 55. Valores medios de aceptación para asistentes de conducción eficiente usados con HUD en función de los usuarios que usan regularmente pantallas en el vehículo (derecha) y los que no las usan (izquierda).....	140
Figura 56. Valores medios de aceptación para el uso de pantallas HDD o HUD en función de los usuarios que usan regularmente pantallas en el vehículo (izquierda) y los que no las usan (derecha).....	140

Figura 57. Valores medios de aceptación para el uso de aplicaciones de navegación GPS en función de los usuarios que usan regularmente pantallas en el vehículo (derecha) y los que no las usan (izquierda)	141
Figura 58. Métodos de interacción con dispositivos HUD dependiendo de la edad de los usuarios.....	143
Figura 59. Valores de aceptación media del uso del reconocimiento de voz como método de interacción con dispositivos HUD en función de usuarios que usan regularmente dispositivos (derecha) y usuarios que no los usan (izquierda)	144
Figura 60. Valores de aceptación media para Google Now Launcher (GNL) y para Voice Access (VA) en función de usuarios que usan regularmente dispositivos (izquierda) y usuarios que no los usan (derecha)	145
Figura 61. Preferencia de método de interacción por voz para cada tarea realizada.....	147
Figura 62. Nivel de SO ₂ en un periodo de tiempo.....	155
Figura 63. Representación de datos en Gijón (España) con tecnología NanoEnvi - CATEDBOX	155
Figura 64. Aplicación corriendo con la categorización de representaciones basadas en mapas	158
Figura 65. Mapas propuestos.....	160
Figura 66. Gráficas propuestas	161
Figura 67. Indicadores propuestos.....	163
Figura 68. Captura de pantalla de la aplicación con pregunta de interpretación de gráficas	165
Figura 69. Selección de mapa por grupos de usuarios en función de la edad	167
Figura 70. Selección de mapa por grupos de usuarios en función del conocimiento en medioambiente	167
Figura 71. Selección de mapa por grupos de usuarios en función del perfil.....	168
Figura 72. Selección de gráfica por grupos de usuarios en función del perfil	169
Figura 73. Selección de indicador por grupos de usuarios en función del perfil	170
Figura 74. Selección de dispositivo por categoría de representación.....	170
Figura 75. Tipo de datos para grupos de usuarios en función del nivel de conocimiento en medioambiente.....	172

Índice de Tablas

Tabla 1. Análisis y desarrollo de una Smart City atendiendo a la inclusión de Redes Vehiculares en los bloques temáticos sobre Movilidad, Sostenibilidad y Población basado en la propuesta de [3]	11
Tabla 2. Diferencias entre la capa física del estándar 802.11a y 802.11p.....	42
Tabla 3. Comparativa de Simuladores de Tráfico	57
Tabla 4. Parámetros de traza de vídeo.....	62
Tabla 5. Parámetros utilizados en caso de estudio de comunicación V2V con 2 vehículos.....	63
Tabla 6. Parámetros utilizados en caso de estudio de comunicación V2V con 10 vehículos.....	63
Tabla 7. Parámetros utilizados en caso de estudio de comunicación V2V con 20 vehículos.....	64
Tabla 8. Conjunto de Reglas para el sistema de lógica difusa empleado.....	78
Tabla 9. Parámetros de Configuración de la Simulación	79
Tabla 10. Parámetros de Configuración de Red empleada.....	79
Tabla 11. Distancia media recorrida por los vehículos en el escenario 1.....	84
Tabla 12. Número de vehículos que alcanzan la velocidad máxima permitida en la vía en el escenario 1	84
Tabla 13. Valores medios y desviación estándar para velocidades máximas, mínimas y medias en el escenario 1	85
Tabla 14. Valores medios y desviación estándar para la aceleración (m/s ²) en el escenario 1	85
Tabla 15. Valores medios y desviación estándar para los niveles de emisiones de CO ₂ en el escenario 1	86
Tabla 16. Número de vehículos que alcanzan la velocidad máxima permitida en la vía en el escenario 2	87
Tabla 17. Distancia media recorrida por los vehículos en el escenario 2.....	87
Tabla 18. Valores medios y desviación estándar para velocidades máximas, mínimas y medias en el escenario 2.....	88
Tabla 19. Valores medios y desviación estándar para la aceleración (m/s ²) en el escenario 2.....	88
Tabla 20. Valores medios y desviación estándar para los niveles de emisiones de CO ₂ en el escenario 2	88
Tabla 21. Eventos detectados por la aplicación para comunicaciones vehiculares.....	95
Tabla 22. Parámetros de Velocidad de la Prueba Comunicación en Cruce de Vehículos (V2V).....	98
Tabla 23. Parámetros de Velocidad de Prueba de Comunicación de Vehículos en Misma Dirección (V2V).....	98
Tabla 24. Parámetros de Velocidad de la Prueba de Comunicación de Tipo V2I - I2V.....	99
Tabla 25. Descripción de los escenarios.....	115
Tabla 26. Media de tiempo de respuesta para seguir las recomendaciones entre el primer y el último día en función de grupos de usuarios según edad	117

Tabla 27. Media de tipo empleado en seguir las recomendaciones entre el primer y el último día	119
Tabla 28. Evolución de las alarmas entre la línea base y el periodo con asistencia	121
Tabla 29. Especificaciones Técnicas del Dispositivo recPOP	127
Tabla 30. Características Teléfono Móvil Seleccionado	128
Tabla 31. Aplicaciones, descripción y fase del experimento.....	128
Tabla 32. Características de los Participantes en las Fases del Experimento	130
Tabla 33. Partes y Tareas del Bloque 3.....	137
Tabla 34. Fases de la evaluación subjetiva	157
Tabla 35. Detalles del hardware empleado	164
Tabla 36. Detalles del monitor empleado	164



Resumen

En los últimos años, la sociedad está experimentando una gran revolución tecnológica que, junto con la aparición de las tecnologías inalámbricas y dispositivos cada vez más pequeños, está suponiendo un gran impulso en la creación de nuevos servicios y aplicaciones para los ciudadanos. Dentro de esta revolución, las redes de comunicaciones han servido para interconectar personas y dispositivos consiguiendo forjar la *Sociedad de Red* actual.

Hace pocos años apareció el término de Ciudad Inteligente (Smart City). Este concepto se fundamenta en la propuesta de soluciones innovadoras que doten a una ciudad de servicios destinados a facilitar la vida de sus habitantes y que favorezcan el desarrollo de ciudad como conjunto. En este ámbito, los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), han supuesto un relevante auge en el desarrollo de nuevas propuestas tecnológicas aplicadas al mundo del transporte. Dentro de los ITS, surgió el concepto de *redes vehiculares* (*Vehicular Ad-hoc NETWORKS* - VANET). Este tipo de red inalámbrica es capaz de comunicar vehículos e infraestructura para proveer determinados servicios. Actualmente, dichas redes están en el punto de mira del desarrollo tecnológico debido al previsible número de aplicaciones y servicios que pueden aportar al mundo de la conducción y a la sociedad en general.

Una herramienta fundamental para poder estudiar el comportamiento de las redes vehiculares es la simulación. Ante la problemática ofrecida por el alto coste de los dispositivos que implementan estándares dedicados a las redes VANET, como el IEEE 802.11p, y los riesgos de seguridad vial que supone un despliegue por ciudad de este tipo de red, la simulación se hace imprescindible para poder abordar la creación e implementación de nuevas soluciones. En ese sentido, esta tesis doctoral realiza una profunda revisión de las herramientas existentes utilizadas para la simulación de redes vehiculares, proponiendo un caso de estudio aplicado sobre el intercambio de vídeo en este tipo de entornos. Como resultado, se presenta la integración de tres simuladores para llevar a cabo el intercambio de vídeo, consiguiendo una tasa aceptable de información transmitida por los vehículos y evaluando la viabilidad de la propuesta.

La movilidad es uno de los aspectos más destacados en el despliegue de las redes vehiculares. En este sentido, una de las principales contribuciones de esta tesis doctoral es la creación de un plan de movilidad inteligente basado en lógica difusa y en comunicaciones vehiculares que es capaz de determinar cuándo se produce un atasco en ciudad para que los vehículos tomen rutas alternativas. Los resultados de esta propuesta consiguieron alcanzar unas reducciones de emisiones contaminantes de hasta un 12,27%, obteniendo una mejora de la sostenibilidad ambiental en ciudad mediante la toma de rutas alternativas por parte de los vehículos para alcanzar su destino.

Uno de los problemas que plantean los estudios simulados, es la obtención de resultados veraces. Debido a la propia simulación, se pueden obtener conclusiones erróneas que hacen necesario un despliegue real para confirmar que los datos obtenidos en la

simulación son correctos y representativos. Atendiendo a la problemática del alto coste que conlleva este tipo de despliegues, uno de los objetivos planteados por la tesis doctoral, fue el de llevar a cabo un despliegue real mediante el uso de tecnologías accesibles para los ciudadanos. En este punto, se decidió desarrollar una aplicación que hace uso de *Wi-Fi Direct* (tecnología disponible en la mayoría de teléfonos inteligentes actuales), para la detección de posibles atascos o retenciones en ciudad y que fuera capaz de comunicarse con otros dispositivos. Las pruebas reales se llevaron a cabo con dos vehículos que incorporaban la aplicación. Los resultados de este tipo de evaluación fueron satisfactorios en cuanto a la posibilidad existente de realizar comunicaciones vehiculares usando tecnologías accesibles para la población, exponiendo un claro ejemplo de un sistema que puede ayudar a mejorar la movilidad en ciudad.

Una vez llevado a cabo el estudio real, surgió la problemática asociada a la usabilidad de dispositivos embarcados en vehículos que ofrecen servicios de información dentro de las redes vehiculares. A tal efecto, en esta tesis doctoral se propone la evaluación de dos tipos de sistemas que proporcionan información al conductor. En primer lugar, se evaluaron sistemas con pantallas de tipo HDD (*Head-Down Display*), que son dispositivos con pantallas opacas (convencionales). Por otro lado, se estudió una posible solución a los inconvenientes planteados por este tipo de pantallas en la que es necesario apartar la vista de la carretera para prestarles atención. Por ese motivo, se decidió incorporar un dispositivo de tipo HUD (*Head-Up Display*) que contiene una pantalla transparente y puede ser ubicado en el campo visual de conducción para poder ver sobre él la información relativa al contexto en el que el vehículo se mueve. Los resultados obtenidos son alentadores, pudiendo comprobar la gran aceptación y usabilidad que esta clase de sistemas de visualización de información tiene entre los usuarios.

Siguiendo la línea de la sostenibilidad ambiental, desde el grupo de investigación en el que se desarrolla esta tesis doctoral, se propusieron las redes de vehículos móviles como solución para la medición de la contaminación. Llegados a este punto, se desplegó un servicio de monitorización ambiental incorporado en transportes públicos (autobuses, recogida de residuos, etc.), que fueron capaces de medir la contaminación en ciudad. El principal problema que se planteó fue el cómo representar ese tipo de información a los ciudadanos para que fuera comprensible. Como consecuencia, se decidió llevar a cabo una prueba subjetiva sobre métodos para representar esta clase de información. Los resultados nos permitieron conocer cuáles eran las representaciones en materia de contaminación más adecuadas, así como los dispositivos sobre los que visualizarlas y los tipos de datos que más interesaban a los diferentes grupos de usuarios.

Como vemos, la presente tesis doctoral, propone un estudio amplio de los entornos de redes vehiculares y de su inclusión dentro de un entorno de Smart City, enfatizando la temática sobre la movilidad inteligente y la sostenibilidad ambiental, sin olvidar la tecnología necesaria para la implantación real de nuevas soluciones enfocadas siempre a la mejora del transporte en ciudad y la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.

Palabras Clave: Redes Vehiculares, Movilidad Inteligente, Sostenibilidad Ambiental, Smart City.



Abstract

In recent years, the society is experiencing a great technological revolution which, together with the emergence of wireless technologies and smaller devices, is leading to a great impulse in the creation of new services and applications for citizens. Within this revolution, communications networks have served to interconnect people and devices by forging the current Network Society.

A few years ago, the term Smart City appeared. This concept is based on the proposal of new solutions that provide a city with services designed to improve the lives of citizens and favor the development of a city as a whole. In this area, the Intelligent Transport Systems (ITS) have led to an important rise in the development of new technological proposals applied to the world of transport. Within the ITS, the concept of vehicular networks arose (Vehicular Ad-hoc NETWORKS - VANET). This type of wireless network is capable of communicating vehicles and infrastructure to provide certain services. At present, such networks are in the sights of technological developments due to the expected number of applications and services that can contribute to the world of driving and society in general.

Simulation is a fundamental tool in the study of the behavior of vehicular networks. In view of the high cost of devices that implement dedicated standards for VANET networks, such as IEEE 802.11p, and the road safety risks involved in the deployment of this type of network, simulation becomes essential for the creation and implementation of new solutions. In this sense, this PhD Thesis performs a thorough review of the existing tools used for the simulation of vehicular networks, proposing a case study applied on the exchange of video in this type of environments. As a result, the integration of three simulators to carry out the video exchange is presented, obtaining an acceptable rate of information transmitted by the vehicles and evaluating the feasibility of the proposal.

The mobility is one of the most important aspects in the deployment of vehicular networks. In this sense, one of the main contributions of this PhD Thesis is the creation of a smart mobility plan based on fuzzy logic and vehicular communications which is able to determine when a traffic jam occurs in the city, allowing vehicles to adopt alternative routes. The results of this proposal achieve a reduction of pollutant emissions of up to 12.27%, leading to an improvement of environmental sustainability in the city through the adoption by vehicles of alternative routes in order to reach their destination.

One of the problems posed by simulated studies is the achievement of truthful results. Due to the simulation, erroneous conclusions can be drawn which require a real deployment to confirm that the data obtained in the simulation are correct and representative. Considering the high cost of this type of deployment, one of the objectives of the PhD Thesis was to carry out a real deployment through the use of technologies accessible to citizens. At this point, it was decided to develop an application that uses Wi-Fi Direct (technology available in the majority of current

smartphones), to detect possible traffic jams or retentions in the city and capable of communicating with other devices. The actual tests were carried out with two vehicles that incorporated the application. The results of this type of evaluation were satisfactory in terms of the existing possibility of carrying out vehicular communications using technologies accessible to the general public, giving a clear example of a system that can help improve mobility in the city.

Once the actual study was carried out, the problem arose about the usability of devices on vehicles that provide information services in the vehicular networks. For this purpose, this PhD Thesis proposes the evaluation of two types of systems that provide information to the driver. First, systems with HDD (Head-Down Display) type screens, which are devices with opaque (conventional) screens, were evaluated. A possible solution to the problem posed by this type of screens was also studied, as it is necessary to look away from the road in order to see the screen. For this reason, it was decided to incorporate a HUD (Head-Up Display) device that contains a transparent screen and can be located in the visual field of driving in order to be able to view information about the context in which the vehicle is moving. The results obtained are encouraging and verify the great acceptance and usability that this sort of systems of information visualization has among users.

In the line of environmental sustainability, it was proposed by the research group in which this thesis is developed that the networks of mobile vehicles could be a possible solution for the measurement of environmental pollution. Accordingly, an environmental monitoring service was installed in public transport (buses, waste collection vehicles, etc.), capable of measuring environmental pollution in the city. The main problem that we faced was how to represent this kind of information to make it understandable for the general public. For this reason, it was decided to carry out a subjective test on methods to represent information of this type. The results revealed the most appropriate representations of pollution, as well as the devices on which to visualize them and the types of data of most interest to the different groups of users.

As we can see, this PhD Thesis proposes an extensive study on vehicle network environments and their inclusion in a Smart City environment, emphasizing the theme of smart mobility and environmental sustainability, without forgetting the technology necessary for the real implementation of new solutions, with the focus firmly on both improving transport in the city and the quality of life of citizens.

Keywords: Vehicular Networks, Smart Mobility, Environmental Sustainability, Smart City.



Capítulo 1

1 Introducción

La revolución tecnológica sufrida en los últimos años ha supuesto un gran avance en el acceso a la información y las comunicaciones interpersonales. Este hecho, ha provocado un progreso de grandes magnitudes desde un punto de vista transversal, que incluye desde el concepto de Internet de las Cosas (*IoT*) [1], en el que predomina una visión de comunicaciones de las pequeñas infraestructuras, dispositivos o elementos, hasta conceptos más amplios donde se aplica la tecnología a grandes escalas como el caso de las Ciudades Inteligentes (Smart Cities) [2], contexto en el que se desarrolla la presente tesis doctoral.

El concepto de Ciudad Inteligente abarca un amplio abanico de soluciones que dotan a la ciudad de servicios destinados a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y que favorecen el desarrollo de la urbe de forma global. Dentro de estas soluciones aplicadas a la ciudad se encuentran enmarcados los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) o, en inglés, *Intelligent Transportation Systems* (ITS), que han supuesto, a lo largo del siglo XXI, un impresionante avance. Muchas son las aplicaciones y soportes tecnológicos que dan lugar a que encontremos nuevos servicios en este tipo de entornos. Dentro de los ITS, las Redes Vehiculares, también llamadas VANETs (*Vehicular Ad-hoc NETWORKS*), están proponiendo alguno de los avances más importantes que encontramos, y ya se están empezando a comprobar los beneficios que provocan en el parque móvil actual dentro de una ciudad.

Ante el auge de la aparición de nuevos servicios tecnológicos aplicados a las redes de comunicaciones vehiculares y a los ITS en general, los investigadores no tardaron en darse cuenta de lo importantes que eran los conceptos sobre seguridad en las comunicaciones y movilidad de nodos creando dos grandes vertientes de investigación dedicadas a la mejora sustancial de estos conceptos en lo referente al transporte. La primera gran línea de investigación está dedicada a la Seguridad, y basa sus esfuerzos en la detección de riesgos, vulnerabilidades y posibles ataques que pueden sufrir dichas redes, intentando dar solución mediante la proposición de nuevos sistemas enfocados a la preservación de los contenidos que viajan a través de ellas y normalmente apoyados en métodos criptográficos. Para la segunda gran línea, la movilidad, los investigadores centran sus esfuerzos en la identificación de problemas inherentes al movimiento de los nodos de estas redes (los vehículos), qué tipo de interrupción en las comunicaciones se producen (también conocidos como *handovers* en literatura científica), o cómo adaptar la movilidad de nodos en redes heterogéneas compuestas por varios tipos de tecnologías de comunicaciones.

En el desarrollo de las investigaciones e iniciativas comerciales se evidenció la necesidad de la creación de nuevos estándares para la armonización de las redes vehiculares. Debido a ello, diversos institutos de estandarización no tardaron en ponerse a trabajar en busca de una estructuración de las comunicaciones entre vehículos definiendo una arquitectura de red de referencia.

La aplicación directa de redes vehiculares (VANETs) dentro de los ITS, ha permitido que, mediante la colaboración de diversos agentes incluidos en el entorno entre los que se encuentran vehículos y elementos de infraestructura, se puedan implementar servicios que aumenten la seguridad y la eficiencia de la conducción haciendo referencia tanto a la información que proporciona el propio vehículo, como a los datos procedentes del contexto en el que circula.

De todos estos términos hablaremos en este capítulo, atendiendo especialmente a los Sistemas Inteligentes de Transporte y a las Redes Vehiculares incluidas en un entorno de ciudad inteligente (Smart City). También estableceremos la motivación, objetivos y principales aportaciones de la presente tesis doctoral, así como la estructura del documento completo y las publicaciones fruto de nuestras investigaciones en este campo.

1.1 Introducción a las Ciudades Inteligentes (Smart Cities)

Según el “Libro Blanco de Smart Cities” [3], el nivel de población en ciudad sufrirá un drástico aumento que conllevará una serie de problemas como son las dificultades en la organización social, la gestión del territorio y el deterioro del medioambiente. Este tipo de situaciones serán especialmente acentuadas en los entornos urbanos más poblados donde una mayor concentración de habitantes agudizará la incidencia de la problemática mencionada anteriormente. Además de esto, merece la pena destacar que las estimaciones de ciudadanos que habitarán en ciudades en el año 2050 será el 70% del

total de la población mundial, lo que implica que todavía se acentúen más los problemas descritos.

Dada esta situación, los gobiernos y agentes involucrados en la gestión y control de las ciudades, incluyendo a la población que vive en ellas, ven cada vez más necesario un cambio del modelo actual de ciudad. Se pretende que una urbe sea capaz de amoldarse a nuevas necesidades, ofreciendo a los ciudadanos una mejor calidad de vida, a la vez que intenta mitigar o reducir los problemas existentes.

Dentro de este marco es donde toma sentido la idea de Smart City. Este término surgió de la evolución de las denominadas “Ciudades Digitales” nacidas en España en el año 2004 mediante un trabajo que llevó a cabo el Ministerio de Industria con la elaboración del primer programa de Ciudades Digitales que se aplicó a muchas ciudades y provincias del país [4], [5]. Fue un poco más tarde cuando IBM nombraría a este tipo de urbes como Smart Cities.

A partir de este punto es cuándo toma sentido la idea de Smart City, que ha de ser entendida como un concepto holístico y abierto de la definición de ciudad, teniendo el propósito final de alcanzar una gestión eficiente en todas sus áreas (urbanismo, transporte, servicios, sanidad, energía, etc.), satisfaciendo a la vez las necesidades de la ciudad y de sus ciudadanos. Todo ello, debe conseguirse de acuerdo a los principios de Desarrollo Sostenible expuestos en el Programa 21 [6], desarrollado por Naciones Unidas, y tomando la innovación tecnológica y la cooperación entre los diferentes agentes que están involucrados en el entorno del núcleo urbano (agentes económicos y sociales) como los principales motores del cambio hacia el concepto de ciudad eficiente o ciudad inteligente (Smart City).

Una Smart City está compuesta de algunos elementos fundamentales que pasamos a nombrar:

- El espacio urbano
- El sistema de infraestructuras en ciudad
- El complejo de redes y plataformas inteligentes
- La ciudadanía, como pilar fundamental para el desarrollo y uso de nuevos servicios

A partir de aquí, las políticas públicas deberían estar obligadas a incorporar el concepto de Smart City para favorecer la innovación, el desarrollo de ideas, servicios y aplicaciones, que permitan el crecimiento de la ciudad a nivel tanto económico como personal de sus habitantes. En definitiva, ayudar a que se produzca una completa evolución de la ciudad.

1.1.1. Bloques Temáticos de una Smart City

Dentro del despliegue de una Smart City, encontramos diversos bloques temáticos a los que afectarán a diferentes procesos cuya finalidad es conseguir la evolución de la ciudad. Para ello, se deberán aplicar una serie de directrices que serán explicadas a continuación. Entre los bloques más representativos encontramos:

- **Gobierno:** Las entidades gubernamentales son uno de los principales agentes encargados de que el desarrollo y evolución de la ciudad pase de un hecho imaginado a una realidad, por ello se aplican directrices que guiarán este proceso. Uno de los principales retos en este bloque en el contexto de una Smart City es el de la transparencia, en el sentido de permitir a la ciudadanía el acceso a la información que trasciende del Gobierno y la Administración. Llegados a este punto, cobran especial sentido los movimientos denominados como “*Open Data*” y “*Open Government*” que permiten el intercambio y la aportación de datos a la población a través de servicios como la web.

Otro de los principales factores dentro de este bloque es la definición del papel que llevan a cabo las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), por parte de los órganos de gobierno en el despliegue de las Smart Cities. La aplicación de las TIC se ha extendido en el entorno de Smart City en términos de innovación, sostenibilidad y calidad de vida, entendiendo el concepto como un recurso transversal que afecta a todos los bloques temáticos que componen una Smart City, pudiendo conseguir herramientas TIC como los portales multiacceso (web, TV, internet móvil, etc.), la creación de las tarjetas inteligentes “Smart Cards” para el acceso a servicios de la ciudad, los puntos inalámbricos de conexión Wi-Fi, y un sinnúmero de herramientas y servicios tecnológicos al servicio del ciudadano y, en definitiva de la ciudad.

El último punto importante en este apartado es el de los Servicios, buscando un enfoque integral de servicios municipales, públicos y privados. En este sentido existe una necesidad de nuevos modelos de prestación de servicios y una integración adecuada mediante un modelo de gestión eficiente y capaz de garantizar la calidad e innovación. Por otro lado, también podríamos pensar en una serie de servicios mancomunados para entornos de ciudades próximas y gestionadas, por ejemplo, por una misma provincia.

Algunos ejemplos de referencia dentro del ámbito del avance de una Smart City desde el punto de vista Gubernamental a nivel nacional son las ciudades escandinavas. Como muestra de ello, en los rankings desarrollados por el estudio “*European Smart Cities*”, las siete primeras se encuentran entre Finlandia, Dinamarca y Suecia, y así lo demuestran los estudios desarrollados en este sentido como [7], donde tienen en cuenta los avances hacia una ciudad centrada en el ciudadano y en el e-gobierno o [8], donde hablan del transporte sostenible y la política pública.

Dentro del ámbito nacional también son muchas las ciudades que se han sumado a la línea de la transparencia y el e-gobierno, teniendo un claro ejemplo en Pozuelo de Alarcón, donde su ayuntamiento está comprometido con el desarrollo de un nuevo modelo de servicio y de interacción con los ciudadanos basado en e-Gobierno. Otras ciudades como Gijón¹ o Bilbao², han realizado grandes esfuerzos en aspectos relacionados con la accesibilidad de información sobre la corporación municipal y las relaciones con los ciudadanos, obteniendo una calificación de “Excelente” en el Índice de Transparencia en Ayuntamientos desde 2010, como muestran los estudios de L.F Olivares [9] o S. González [10].

- **Movilidad:** La evolución de las ciudades hacia sistemas de transporte más integrados en el entorno, es un hecho contrastado del que los usuarios se deben aprovechar encontrando servicios más rápidos, eficientes y mejor coordinados.

En este caso, el concepto de movilidad dentro de un entorno de Smart City se refiere tanto a la movilidad propiamente dicha, como a la seguridad y la eficiencia de los sistemas de transporte e infraestructuras, a nivel local, nacional e incluso internacional.

Uno de los principales agentes que intervienen en este bloque temático es la creación de Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS), donde se definen un conjunto de actuaciones que tienen como objetivo la implantación de formas de desplazamiento más eficientes y sostenibles dentro de la ciudad. Mediante la creación de los PMUS, podemos conseguir la disminución de atascos, la disminución del consumo de energías no renovables, la mejora en las condiciones de accesibilidad y, en definitiva, todo lo que nos permita mejorar la calidad ambiental de los núcleos urbanos, así como la mejora de calidad de vida de los ciudadanos.

Otro factor principal en este contexto, es la sostenibilidad e innovación en el transporte que se aplica al campo de la movilidad sostenible mediante la incorporación progresiva de vehículos más ecológicos y la acogida de propuestas alternativas. Ejemplos de este comportamiento, son el uso del transporte público como solución de movilidad en ciudad o aquellas desarrolladas por la aplicación de nuevas soluciones tecnológicas.

Claros ejemplos seguidos por ciudades nacionales son Barcelona³ o Santander⁴ entre otras, que desarrollan planes de movilidad sostenible promoviendo, en algunos casos, la creación de proyectos basados en movilidad eléctrica dentro de los denominados “*Living Labs*”, favoreciendo los despliegues de vehículos eléctricos.

¹ <http://www.gijon.es/>

² <http://www.bilbao.eus/>

³ <http://www.barcelona.cat/es/>

⁴ <http://www.smartsantander.eu/>

- **Sostenibilidad:** Uno de los principales factores que afectan a una ciudad depende, en gran medida, de lo cuidadas que estén sus condiciones naturales y medioambientales dentro del entorno urbano. En este caso, las características a nivel medioambiental influyen directamente en el ciudadano a la hora de valorar su atractivo e incluso su nivel de calidad de vida en un entorno más o menos contaminado. Por todo ello, es importante que se desarrolle dentro de la ciudad una gestión medioambiental que la proteja contra elementos adversos que hacen referencia a la contaminación existente, la gestión del agua, la gestión de los residuos y la gestión de los recursos medioambientales que propicien la mejora ambiental de la ciudad.

Uno de los principales ejemplos, que tiene como finalidad crear un entorno más eficiente, limpio y verde, es la capital de Eslovenia, Ljubljana⁵, que supone uno de los referentes en planificación medioambiental en Europa [11].

- **Población:** La ciudadanía es una de las piezas fundamentales para garantizar el éxito de una Smart City ya que la población, es la que puede intervenir en su desarrollo con el objetivo de conseguir servicios que aumenten su nivel de confort.

Uno de los principales factores dentro de este bloque temático es la Participación Ciudadana. Los ciudadanos tienen el derecho de gozar del derecho de tomar parte en los procesos de participación pública para la creación de programas y planes, evaluación de proyectos, desarrollo de legislación, etc. En este sentido, existen diversos métodos para promover la participación pública dentro de un entorno de Smart City como la utilización de distintas redes sociales para la realización de encuestas y votaciones, así como la visualización de sitios web que permitan a los usuarios poder participar de forma más activa en el proceso de construcción del nuevo modelo de ciudad.

Un ejemplo claro sobre este tipo de nuevos paradigmas de participación es el llevado a cabo por el ayuntamiento de Pozuelo de Alarcón y la aplicación de la e-Participación dentro del marco de Gobierno Inteligente explicado en el bloque temático correspondiente.

- **Economía:** Las Smart Cities son los mejores lugares en los que vivir y, por tanto, resultan menos caras de gestionar. Por lo que, la influencia de los beneficios provocados por la integración de servicios inteligentes dentro de una Smart City, influye directamente en la gestión económica de la ciudad.

Entre las principales acciones a llevar cabo dentro de este bloque temático encontramos la opción de crear un mayor atractivo de inversión que permita mejorar el nivel económico de la ciudad, ser capaz de atender a la productividad y competitividad en el mercado de trabajo e intentar promover el atractivo turístico

⁵ <http://www.ljubljanaforum.org/2016/>

de la misma, que implica un nivel de ingresos elevado en algunas ciudades como Viena, Nueva York o París.

Respecto a este bloque, uno de los principales ejemplos nacionales es Valladolid⁶ que apuesta fuertemente por una filosofía “Smart” obteniendo importantes réditos económicos, teniendo uno de los ejes del nuevo modelo en el proyecto “Ríos de Luz” [12], que consiste en la renovación y remodelación del alumbrado público de monumentos y edificios emblemáticos para impulsar la eficiencia y ahorro energético.

Como podemos observar, todos estos bloques están integrados en el concepto global de la definición de Smart City, pudiendo constituirse de tal forma que la suma de todos, de lugar una ciudad más eficiente y accesible para todos los integrantes que conviven en ella.

1.2 Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS)

Sin perder el contexto de Smart City explicado en la sección anterior, en este punto atendemos a los Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transport Systems* - ITS), que conforman un conjunto de soluciones tecnológicas basadas en la informática y las telecomunicaciones (Telemática) diseñadas para mejorar la operación y la seguridad del transporte terrestre. Bien es cierto, que su uso puede ser aplicado a otro tipo de medios de transporte, como el aéreo, en el que ya se han desarrollado diversos estudios de seguridad, como el presentado por Strohmeier en su Tesis Doctoral habla de la seguridad en las comunicaciones de redes aéreas de nueva generación [13], aunque su principal desarrollo ha estado siempre orientado al transporte por carretera.

Desde hace tiempo, aplicaciones como el cobro electrónico de peajes, la vigilancia automática de infracciones al volante y, más recientemente, sistemas de notificaciones de emergencias a bordo del vehículo, como por ejemplo *eCall* [14], que será obligatorio a partir del año 2018, han estado y estarán presentes en las carreteras. En los últimos años, ha aparecido diversa reglamentación a nivel europeo y nacional sobre la implantación de los ITS, encontrando en la Directiva 2010/40/UE del Parlamento Europeo y Del Consejo de 7 de Julio de 2010 [15] y en el Real Decreto 662/2012, de 13 de Abril [16], la regulación dentro del marco europeo para la implantación de los sistemas inteligentes de transporte en el sector del transporte por carretera y para las interfaces con otros modos de transporte actual.

Como vemos, los ITS conforman un esfuerzo global entre gobiernos, industria privada y centros de investigación para la aplicación de nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones para dar respuesta a los problemas del transporte global [17]. Pese a que la diversidad de problemas, desarrollos tecnológicos y objetivos es muy amplia, se definen algunos objetivos básicos que los ITS deben abordar:

⁶ <https://www.valladolid.es/es>

- Mejorar la **Seguridad** en todos los medios de transporte actuales.
- Mejorar la **Eficiencia** de los sistemas de transporte reduciendo, de esta forma, los tiempos de viaje y las congestiones de tráfico mediante planes de movilidad.
- Implantar dentro del transporte **Políticas de Desarrollo Sostenible**, reduciendo las emisiones de los gases y optimizando el uso de infraestructuras.
- Incrementar el **Confort** de los pasajeros con servicios de información apropiados: Sistemas de ayuda a la toma de decisiones, sistemas adecuados de navegación, etc.

Un paso más para alcanzar la consecución de los objetivos planteados ha sido la aparición de los Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativos, o en inglés, *Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS)*. En este tipo de ITS, encontramos diferentes entidades que cooperan con el fin de conseguir un servicio que permita alcanzar alguno de los objetivos planteados con anterioridad. De esta forma, y aplicando este concepto al contenido de la presente Tesis Doctoral, encontramos la posibilidad de comunicación y cooperación de elementos que componen la carretera: vehículos, señales de tráfico, semáforos, etc., en busca de mayor seguridad, mejora de la sostenibilidad ambiental, mayor eficiencia y aumento del confort de forma más efectiva que mediante el uso de ITS autónomos. La innovación tecnológica de este tipo de sistemas radica en la cantidad de información que son capaces de manejar al tener más agentes involucrados en el proceso de creación de un servicio para el transporte.

Mediante la consecución de los objetivos planteados anteriormente, los C-ITS e ITS, mediante la aplicación de sistemas de procesamiento de información avanzada, comunicaciones, sensorización y tecnologías de control, pueden intentar solventar diversos problemas del transporte global siendo necesario un mantenimiento o aumento de los recursos invertidos en la investigación y desarrollo (I+D) para este tipo de tecnologías.

1.3 Redes Vehiculares

Como se ha explicado anteriormente, los C-ITS intentan buscar soluciones a los problemas de seguridad de pasajeros y congestión del tráfico, además de mejorar el confort y la información que reciben tanto conductores como pasajeros. Para conseguir que los elementos sean cooperativos, debe existir una comunicación entre ellos. Con el fin de proporcionar esta funcionalidad, se hace imprescindible el uso de comunicaciones inalámbricas dentro de los sistemas de transporte mediante el desarrollo de redes vehiculares.

Una red vehicular viene definida por el acrónimo VANET (*Vehicular Ad-hoc NETWORK*) consistiendo en un conjunto de vehículos en movimiento que crean redes altamente dinámicas [18]. De este modo, las VANETs son un tipo especial de redes móviles Ad-hoc (MANETs) definidas en el estudio de G. F Marias et al. [19]. En el despliegue de este tipo de redes intervienen dos agentes fundamentales: Vehículos, equipados con sistemas de comunicaciones inalámbricos, e Infraestructuras.

1.3.1. Elementos de las Redes Vehiculares

Como hemos explicado anteriormente, el despliegue de las redes VANETs se fundamenta en dos tipos de nodos: Vehículos e Infraestructuras, equipados con diferentes sistemas de comunicaciones. El vehículo, debe incorporar una unidad de abordo (*On-Board Unit*, OBU) que dispone de un sistema inalámbrico de comunicaciones de corto alcance que permite la formación de redes ad-hoc. Cuando hablamos de infraestructuras, por norma general, serán nodos situados al lado de la carretera (*Road-Side Unit*, RSU) utilizados para conectar los vehículos a la infraestructura de red cableada o incluso expandir a lo largo de un área servicios o aplicaciones dentro de la propia red VANET mediante conexiones inalámbricas.

Otro elemento común dentro de un entorno de red vehicular es el *Global Positioning System* (GPS)[20], necesario para localizar el vehículo y ofrecer servicios de asistencia a la conducción o geolocalización aplicables dentro de flotas profesionales y no profesionales de conductores.

Existen otros elementos secundarios que también pueden ser incorporados dentro de un entorno de red vehicular como sensores que reciben información útil del vehículo (o su entorno) y que generalmente el conductor no puede percibir por sí mismo. Claro ejemplo de ello, son los sistemas de asistencia al aparcamiento, servicios de ayuda en el adelantamiento, las aplicaciones de telefonía por Bluetooth, etc. Estos sistemas pueden proporcionar información útil dentro del vehículo, que puede ser transmitida a otros automóviles con el fin de crear un servicio colaborativo entre los nodos que conforman la red vehicular.

1.3.2. Tipos de Comunicación dentro de una Red Vehicular

Dentro del entorno de una red vehicular se pueden producir varios tipos de comunicación entre nodos. Podemos encontrar los siguientes:

- Vehículo-a-Vehículo (V2V): Comunicaciones efectuadas entre los vehículos de un modo ad-hoc espontáneo. En este tipo de comunicación un vehículo puede intercambiar información valiosa con otros vehículos como, por ejemplo, el estado de la vía mediante la detección y aviso de accidentes u obras, las condiciones actuales del tráfico u otros servicios susceptibles del uso de este tipo de comunicación.
- Vehículo-a-Infraestructura (V2I): Este tipo de comunicación se realiza entre los vehículos y las estaciones situadas al lado de la carretera (*RSUs*). Sirven, por

ejemplo, para intercambiar información sobre las condiciones de la vía y avisos para que la infraestructura tenga en consideración la información acerca del entorno de la red y de los nodos que se comunican con ella. Este tipo de comunicaciones también se utiliza como enlace para el intercambio de datos con redes externas, por ejemplo, Internet.

- **Infraestructura-a-Vehículo (I2V):** Este caso de comunicación es similar a la presentada en el punto anterior, pero atendiendo a la comunicación en dirección opuesta, es decir, de infraestructura a vehículo. Mediante este tipo de comunicación una RSU puede transmitir información recopilada previamente o que se ofrezca a través de alguna red externa como Internet. Un posible servicio que hace uso de este tipo de comunicación sería el de información en tiempo real del estado de la vía o las condiciones del tráfico enviando información desde la infraestructura al vehículo (o vehículos).
- **Infraestructura-a-Infraestructura (I2I):** Este tipo de comunicación suele ser el menos habitual dentro de una red vehicular completa. Encontramos útil la posibilidad del intercambio de información entre infraestructuras obteniendo beneficios como la difusión de información recopilada por los vehículos y enviada previamente a las infraestructuras para, posteriormente, ofrecer servicios de información al conductor. Este tipo de comunicación puede estar implementada haciendo uso de infraestructuras existentes como puede ser el cableado de conexión a Internet ubicado en las vías urbanas.

1.3.3. Integración de Redes Vehiculares en los Entornos de Smart Cities

Enlazando el concepto de Red Vehicular y de Smart City (explicado en la sección 1.1), mediante los bloques temáticos y factores clave que intervienen en su despliegue, podemos atender a la Movilidad, Sostenibilidad, Población y Economía como ejes fundamentales de la presente Tesis Doctoral. En este sentido, el uso de Redes Vehiculares dentro de un entorno urbano, propicia el despliegue de nuevas aplicaciones que den servicios a la población de la ciudad para provocar una mejora de su calidad de vida en el ámbito del transporte.

Los autores del “Libro Blanco de Smart Cities” [3], proponen un método básico de análisis individual para cada uno de los municipios sugiriendo la utilización de una tabla que establece la relación entre los bloques temáticos, los factores claves que influyen en cada uno de ellos, y exponiendo el grado de desarrollo actual, la viabilidad y la prioridad de las posibles soluciones.

Haciendo referencia a esta propuesta, la Tabla 1 muestra la relación entre los factores clave que intervienen en el desarrollo de una ciudad y los bloques temáticos a los que hacen alusión. Vemos cómo, los principales aspectos afectados son: Movilidad, Sostenibilidad, Población y Economía. Así mismo, podemos observar como los factores clave presentados están fuertemente relacionados con la conectividad entre vehículos,

consiguiendo la creación de planes de movilidad inteligente que puedan dar lugar a una mejora medioambiental y un turismo más eco-eficiente. Todo lo expuesto anteriormente, también se basa en la participación ciudadana para el despliegue y validación de aplicaciones dentro de este tipo de entornos.

Bloque	Factor Clave
Movilidad	Conectividad y transporte local
Sostenibilidad	Contaminación (aire y agua)
	Instrumentos de Protección medioambiental
Población	Participación Ciudadana
Economía	Turismo eco-eficiente

Tabla 1. Análisis y desarrollo de una Smart City atendiendo a la inclusión de Redes Vehiculares en los bloques temáticos sobre Movilidad, Sostenibilidad y Población basado en la propuesta de [3]

Pese a que parecen factores clave independientes, entre ellos están relacionados dentro del concepto abierto de Smart City, ya que, mediante la aplicación de diversas aplicaciones y servicios, pueden implicar una mejora sustancial de varios factores clave y bloques temáticos relacionados con la motivación y objetivos de esta Tesis Doctoral y que serán explicados en los siguientes apartados.

1.4 Motivación de la Tesis Doctoral

La incorporación de redes de comunicaciones vehiculares en un entorno urbano, motivan la creación de nuevos servicios que pueden ofrecer al conductor y pasajeros del vehículo una serie de ventajas. Estos servicios son categorizados en tres grupos [21], [22]:

- **Eficiencia del tráfico y Asistencia al Conductor:** Este tipo de servicios están orientados a incrementar la capacidad de la red de carreteras y reducir el tiempo de trayectos. Como principal ejemplo podemos proponer la planificación dinámica de rutas (movilidad inteligente), el control de intersecciones o servicios de detección y mitigación de congestiones que dará lugar a la reducción de gases contaminantes y la mejora medioambiental.
- **Seguridad:** Los accidentes en carretera producen alrededor de 1.25 millones de muertes cada año, siendo la primera causa mundial de muerte de personas de entre 15 y 29 años [23]. Estos servicios buscan la reducción de la tasa de accidentes y el aumento de la seguridad tanto para los ocupantes del vehículo como para los peatones. Algunos de los ejemplos destacables en este sentido pueden ser los

sistemas de anticolidión y notificaciones sobre la proximidad de accidentes o la detección de vehículos de emergencia cuando éstos se aproximan a nuestra propia ubicación.

- **Entretenimiento e Información (*infotainment*):** El objetivo de este tipo de servicios es incrementar el confort de los ocupantes de los vehículos mediante el ofrecimiento de servicios de valor añadido como el acceso a internet y contenidos multimedia. Ejemplos para clarificar este tipo de servicios pueden ser el vídeo bajo demanda, el pronóstico del tiempo y videoconferencias, información sobre la propia conducción con el fin de realizarla de forma más eficiente, etc.

Como vemos, estos nuevos servicios garantizarían 2 factores muy importantes a la hora de poder realizar una conducción de forma más adecuada:

- Reducción del número de accidentes en carretera.
- Disminución de la contaminación ambiental que existe en las ciudades.

Para todo ello, se debe estudiar, no solo las redes de comunicaciones de vehículos, sino también el entorno que las rodea y los medios necesarios para conseguir que esos objetivos se cumplan. A raíz de esto, se planteó la presente Tesis Doctoral, teniendo como principal objetivo la realización de un profundo estudio de las redes vehiculares, no únicamente desde el punto de vista de las comunicaciones, sino también del contexto en el que están envueltas, aplicándolo especialmente a entornos de movilidad inteligente y a temas relacionados con la sostenibilidad ambiental en las ciudades que se están forjando en la actualidad: Las “*Smart Cities*” (Ciudades Inteligentes).

1.5 Objetivos de la Tesis Doctoral

El objetivo general de la Tesis Doctoral es el de realizar un análisis en profundidad de las redes vehiculares, no solo desde el punto de vista de las comunicaciones entre automóviles, sino también de flotas de vehículos que atienden a algún servicio proporcionado dentro de los entornos vehiculares centrándonos sobre algunos ejes fundamentales:

- Uso de estándares dedicados a las Redes Vehiculares (IEEE 802.11p) para la creación de nuevos servicios.
- Uso de Tecnologías Convencionales para dar Soporte a las Redes Vehiculares.
- Movilidad Inteligente en Redes Vehiculares.
- Usabilidad de Dispositivos Incluidos en Entornos de Redes Vehiculares.

- Sostenibilidad Ambiental en Entornos de Ciudades Inteligentes Mediante la Aplicación de Redes Vehiculares o Flotas de Vehículos.
- Eficiencia en la Conducción.

Para lograr alcanzar el objetivo general hace falta establecer objetivos secundarios que deberán ser atendidos con el fin de completar el estudio que nos compete. A continuación, se presentan los más importantes:

- Revisar de forma exhaustiva el estado actual de redes de comunicaciones vehiculares y sus aplicaciones.
- Estudiar las herramientas de simulación para la creación y despliegue de servicios orientados a las redes vehiculares.
- Desarrollar y desplegar el uso de tecnologías inalámbricas convencionales para dar soporte a las redes vehiculares.
- Desarrollar planes de movilidad inteligente en entornos urbanos atendiendo a la toma de decisiones inteligentes para la selección de rutas en función del contexto de la vía.
- Estudiar las posibilidades existentes para la reducción de la contaminación ambiental en ciudades mediante el uso de redes vehiculares o flotas de vehículos.
- Examinar y analizar la información de una red de vehículos encargada de la monitorización en tiempo real de la contaminación en ciudad.
- Analizar la información localizada en entornos vehiculares como: información del propio vehículo, interacción con el entorno y datos medioambientales.
- Estudiar la usabilidad de dispositivos de abordaje del vehículo para la visualización de diversa información.
- Estudiar la inclusión de las redes vehiculares en las ciudades inteligentes.

Todos estos objetivos parciales nos servirán para conseguir alcanzar el objetivo principal de la Tesis Doctoral, que versa sobre los ejes explicados con anterioridad. En las siguientes subsecciones se describen los más importantes.

1.5.1. Desarrollar planes de movilidad inteligente en entornos urbanos

Hoy en día, el incremento del número de vehículos que circulan por ciudad y el consecuente aumento de la contaminación, están dando lugar a que las principales administraciones y gobiernos tomen medidas drásticas como la prohibición del estacionamiento en zonas céntricas de las ciudades o la limitación de la libre circulación en función del número de matrícula de los vehículos.

En la actualidad, el diseño, desarrollo e implantación de planes de movilidad inteligente dentro de entornos urbanos puede suponer grandes beneficios a todos los agentes involucrados. En primer lugar, la disminución de la cantidad de tiempo empleada en los trayectos implica una mejora en la eficiencia del transporte por carretera que permite, a su vez, que el vehículo esté menos tiempo en funcionamiento y, por tanto, consumiendo menos combustible y emitiendo un número menor de gases contaminantes al medioambiente.

1.5.2. Creación de aplicaciones como soporte a comunicaciones vehiculares mediante el uso de estándares comerciales para la creación de planes de movilidad

Pese a que existen estándares destinados a las comunicaciones vehiculares, como el IEEE 802.11p, el despliegue comercial de este tipo de tecnología no se ha extendido con la rapidez esperada debido al alto coste que supone para la empresa automovilística y el consecuente desembolso que los usuarios deben realizar al adquirir este tipo de elementos de comunicación, así como la falta de seguridad que plantea la inclusión de esta tecnología en el mundo real. Por ello, la creación de aplicaciones y servicios que de soporte a comunicaciones vehiculares mediante el uso de estándares comerciales (inalámbricos), como *Wi-Fi Direct*, ha sido considerado en la presente Tesis con el firme objetivo de conseguir la adecuación de tecnologías más accesibles a los usuarios que pueden permitir la creación de estos servicios y aplicaciones bajo condiciones determinadas y en entornos de conducción controlados y reales.

1.5.3. Estudiar las posibilidades existentes para la reducción de la contaminación ambiental en ciudad

Entroncando con la temática del objetivo planteado en las secciones anteriores (1.5.1 y 1.5.2), este apartado plantea el estudio de las posibilidades existentes para la reducción de la contaminación ambiental que se produce en ciudad. Actualmente, esta contaminación se debe, en gran parte, a la afluencia de vehículos que transitan por ella debiéndose desarrollar nuevos planes de monitorización ambiental y sistemas que permitan reducir esta contaminación sin la toma de decisiones drásticas como la prohibición del tráfico en ciudad. A través de diferentes planes de movilidad y entornos telemáticos de recogida de información de la propia ciudad es posible la creación de modelos predictivos o reactivos que sean capaces de mitigar, o por lo menos paliar, los efectos negativos que la contaminación ambiental provoca en las urbes.

1.5.4. Analizar la usabilidad de dispositivos de abordaje del vehículo para la visualización de información

En la actualidad, el número de dispositivos que llevamos incorporados a bordo del vehículo está incrementando considerablemente, así como la información que recogen acerca del propio vehículo o del contexto que le rodea. De esta forma, navegadores GPS, ordenadores de abordaje, cuadros de mandos u otras aplicaciones externas de música o información del estado del tráfico o de la climatología, ofrecen al conductor

una cantidad ingente de información que debe ser procesada de forma correcta para no poner en riesgo la seguridad.

Con el objetivo en mente de la mejora del proceso de conducción en busca de una conducción más eficiente y segura, se persigue la realización de varios análisis de usabilidad e interacción con dispositivos de abordo en el vehículo, que nos permitan visualizar información intentando, en todo momento, disminuir el riesgo de seguridad que supone prestar atención a todos los datos que encontramos cuando estamos circulando.

1.6 Principales Aportaciones

Como resultado de perseguir los objetivos planteados en el Apartado 1.4, destacamos, en la presente sección, las principales aportaciones surgidas durante el proceso investigador y que son incluidas en cada uno de los Capítulos que componen la presente tesis doctoral.

1.6.1. Revisión de simulación en entornos de Redes VANET y caso de estudio sobre transmisión de datos de vídeo bajo el estándar H.265

La simulación de entornos de redes VANET es un elemento fundamental para el estudio y desarrollo de nuevos servicios. Ante la imposibilidad de la creación de una red vehicular real de grandes dimensiones que use el estándar dedicado a este tipo de redes (802.11p), la simulación de entornos vehiculares para comunicaciones se hace un elemento imprescindible.

Ante esta problemática y con el objetivo de realizar un estudio amplio sobre redes vehiculares en entornos de ciudad, se decidió realizar una revisión del protocolo IEEE 802.11p y de los entornos de simulación para redes VANET y aplicarlo sobre un caso de estudio concreto de transmisión de datos de vídeo bajo el estándar H.265. De esta forma, se comprobó la viabilidad del uso de este tipo de tecnología en el estudio de las VANETs.

En este caso, en el **Capítulo 3** se tratará en profundidad la temática relacionada con este tipo de entornos y caso de estudio propuesto a tal efecto.

1.6.2. Creación de planes de movilidad inteligente aplicando metodologías de lógica difusa y comunicaciones vehiculares

Uno de los principales problemas de contaminación en ciudad se debe a las emisiones que hacen los vehículos. Por ese motivo, en muchas ciudades, se están estableciendo diversas regulaciones que prohíben la libre circulación de los vehículos, con el objetivo de que los niveles de contaminación desciendan de forma considerable.

Desde el punto de vista opuesto a este tipo de decisiones, creemos que la creación de planes de movilidad inteligente puede ayudar a mitigar los efectos nocivos de las emisiones de gases contaminantes sin la necesidad de aplicar normativa restrictiva. Por ello, se ha estudiado la creación de planes de movilidad inteligente en ciudad y optado por la aplicación de lógica difusa y comunicaciones vehiculares en la toma de decisiones de elección de ruta.

El **Capítulo 4** presenta, sin lugar a duda, una de las mayores aportaciones de la presente Tesis, desarrollando un plan integral de movilidad inteligente en ciudad haciendo uso de comunicaciones de tipo V2V y V2I.

1.6.3. Aplicación de Wi-Fi Direct como tecnología accesible para su uso en comunicaciones vehiculares relacionadas con servicios de movilidad inteligente en ciudad

Uno de los principales problemas al intentar desplegar una red vehicular real, es el alto coste actual de los equipos que implementan los estándares dedicados a este tipo de entornos (IEEE 802.11p) y los riesgos en la seguridad cuando aplicamos elementos prototípicos en un entorno real.

Nuestra aportación en ese sentido, se basa en la consecución de aplicaciones soportadas por otras tecnologías (en este caso *Wi-Fi Direct*) para ofrecer servicios de apoyo a las comunicaciones vehiculares puras que aplican los estándares destinados a ellas.

El **Capítulo 4** de la presente tesis, profundiza en la aplicación de diferentes tecnologías alternativas para la realización de comunicaciones vehiculares y presenta el desarrollo de una aplicación que atiende servicios de movilidad inteligente para detectar el estado de la vía en tiempo real y comunicar esa información a otros vehículos (o infraestructura) vía *Wi-Fi Direct*. De esta forma, hemos conseguido crear un servicio de comunicaciones vehiculares que, bajo ciertas condiciones, es capaz de reconocer el estado actual de las carreteras y compartir esa información con vehículos de su entorno.

1.6.4. Realización de estudios de Usabilidad e Interacción con dispositivos embarcados en el vehículo

Cuando hablamos de comunicaciones vehiculares, lo hacemos en el sentido del intercambio de información. Esta información que recibimos y/o enviamos debe ser presentada de forma correcta a los usuarios de los vehículos con el propósito de no disminuir la eficiencia y seguridad en el proceso de conducción.

Por ese motivo, el **Capítulo 5** trata de profundizar en la temática relacionada con la usabilidad de dispositivos embarcados en vehículos. Para ello, se han diseñado y ejecutado, diferentes estudios sobre la inclusión de nuevos dispositivos en entornos vehiculares para probar su viabilidad, realizando pruebas reales con usuarios. En primer lugar, se analizó el comportamiento de los conductores valorando el impacto que tiene la inclusión en el vehículo de dos sistemas de asistencia a la conducción mediante la

visualización de información en una pantalla convencional (HDD - *Head-Down Display*) ubicada en la zona lateral del salpicadero del vehículo. Por otro lado, se efectuaron diversas pruebas mediante la utilización de dispositivos de tipo HUD en el entorno vehicular, que satisfacen, de forma considerable, las pretensiones de los usuarios a la hora de la visualización de información e interacción con el vehículo.

Como aportación de este tipo de estudios, hemos conseguido obtener una buena aproximación a la representación de información dentro de la cabina de los vehículos y analizado, el nivel de aceptación que este tipo de nuevas tecnologías puede tener y el impacto que genera su incorporación en un entorno vehicular.

1.6.5. Revisión de redes de monitorización ambiental en ciudad y caso de estudio sobre representación de información

Esta última aportación, tratada con todo detalle en el **Capítulo 6**, está relacionada con la problemática explicada en los puntos 1.6.2 y 1.6.3 sobre la relación entre la movilidad y la contaminación en ciudad. Actualmente ya existen algunas redes fijas que detectan la polución en puntos concretos. Esta metodología queda obsoleta por la imprecisión que lleva asociada (al tener puntos aislados de la ciudad) o el gran gasto que supone poner muchos puntos de monitorización ambiental de forma fija. La solución propuesta consiste en la monitorización ambiental móvil mediante redes de vehículos. Llegados a este punto, se presenta la problemática de la representación de datos móviles tanto para usuarios como para expertos en medio ambiente que pueden tomar medidas al respecto. Por todo ello, se decidió realizar un estudio de representación de información ambiental recogida por una red de monitorización móvil (autobuses urbanos) a diferentes grupos de ciudadanos (pilar fundamental dentro de una ciudad inteligente).

1.7 Organización del Documento

La presente Tesis Doctoral se encuentra organizada en un conjunto de 7 capítulos que siguen una secuencia lógica en la investigación de las redes vehiculares desde un punto de vista global. De este modo se presenta, en primer lugar, el marco teórico en el que está encuadrada. A continuación, se propone la aplicación directa de la simulación en este tipo de redes, para continuar explicando las partes y estudios realizados dentro del campo que abarca; movilidad inteligente y sostenibilidad ambiental. Finalmente se presentan las conclusiones y líneas de trabajo futuro en el área.

De esta forma, el **Capítulo 1** (en el que se incluye esta sección) recopila la información referente a la Introducción de la presente Tesis Doctoral donde se abordan aspectos introductorios sobre los entornos de Ciudades Inteligentes (Smart Cities), los Sistemas Inteligentes de Transporte y las Redes VANET. Así mismo, este capítulo también expone la motivación y objetivos planteados. Además, se tienen en cuenta las principales aportaciones efectuadas durante el proceso investigador y las publicaciones derivadas de la Tesis Doctoral.

El **Capítulo 2** desarrolla el Marco Teórico genérico en el despliegue de Redes Vehiculares (VANETs) dedicando especial atención a la estandarización de las mismas, los proyectos relacionados con ellas y a algunos despliegues que hacen uso de esta tecnología. Por otro lado, se atiende a las aplicaciones dedicadas a esta clase de redes que pueden ofrecer diferentes tipos de servicio a la ciudadanía.

En el **Capítulo 3** se muestra una descripción del estándar dedicado a las redes vehiculares, el IEEE 802.11p. Por otro lado, se analizan tanto el proceso de simulación de las redes vehiculares, como las principales herramientas empleadas para su implementación, siendo una propuesta fundamental para el estudio de este tipo de tecnología. Como consecuencia, se presenta un caso de estudio concreto donde se revisan los entornos de simulación destinados a este tipo de redes y se propone una simulación real del intercambio de vídeo bajo el estándar H.265/HEVC dentro de una red vehicular que usa el estándar IEEE 802.11p.

El **Capítulo 4** está enfocado al campo de la movilidad inteligente en redes vehiculares contemplando diversas aplicaciones y desarrollando un completo caso de estudio sobre movilidad en entornos de ciudades inteligentes haciendo uso de un enfoque basado en lógica difusa y comunicaciones vehiculares. Por otro lado, se propone un sistema que busca un plan de movilidad inteligente en un escenario real. El objetivo principal es ofrecer a la población, servicios y aplicaciones de interés mediante el uso de tecnologías accesibles a los usuarios, como *Wi-Fi Direct*, que permitan la comunicación vehicular.

Otro de los puntos importantes dentro de las redes y entornos vehiculares es la usabilidad de dispositivos embarcados en el vehículo. El **Capítulo 5** es el destinado a esta área realizando varios estudios sobre aplicaciones de eficiencia en la conducción y navegación en entornos vehiculares que ofrecen información, así como la evaluación de diferentes dispositivos de representación enfocados al HCI (*Human-Computer Interaction*) entre la interfaz de representación y conductor.

El **Capítulo 6** abarca la temática relacionada con la sostenibilidad ambiental aplicada a las redes vehiculares, teniendo en cuenta los efectos positivos que pueden producir las flotas de vehículos en ciudad y desarrollando un caso de estudio sobre diferentes métodos de representación de información capturada mediante redes de monitorización de calidad ambiental en ciudad.

Por último, el **Capítulo 7** presenta las principales conclusiones obtenidas en todo el proceso de investigación y en el desarrollo de la Tesis, así como las líneas futuras de trabajo que están relacionadas con los entornos y redes vehiculares aplicadas a las ciudades inteligentes.

1.8 Publicaciones Derivadas de la Tesis Doctoral

Durante el periodo en el que se han realizado los trabajos de investigación dentro del ámbito de la Tesis Doctoral en la Universidad de Oviedo conducentes a la obtención del

título de Doctor, se han realizado diversas publicaciones científicas que se resumen en el presente apartado. Están organizadas según el medio de divulgación elegido: Artículos en Revistas y Aportaciones en Congresos.

1.8.1. Artículos en Revistas

- José A. Sánchez, Laura Pozueco, David Melendi, Xabiel G. Pañeda, Roberto García, Abel Rionda and Alejandro Alija. **Subjective Assessment of Representation Methods for Environmental Mobile Monitoring Networks in Cities.** *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 13, N°. 12, pp. 3987-3996, 2015 (Impacto: 0.436/Q4/JCR-2015).

Estado: Publicado

Abstract - Air quality is an important problem because it has a direct impact on human health and global warming. For years, governments have been monitoring air quality using fixed stations. However, these stations only examine pollution at specific locations. Therefore, pollution studies can only be created by extrapolation. This situation may be improved by increasing the number of stations or by deploying mobile monitoring networks. When it comes to representing data, a network with fixed stations may show an evolution of measurements in time. In the case of mobile networks, a problem appears when information needs to be represented since they involve physical movement. Due to the novelty of mobile monitoring networks, there is no general consensus on how data must be represented. In this paper [24], we present a study conducted to determine how environmental data gathered from mobile networks should be represented. We evaluate different methods for environmental data representation according to users' interpretability. We also determine the preferred type of display to access this type of information. Finally, we obtain users' preferences regarding the usefulness of different types of information according to their profile. A total of 110 users have participated in the study and the results show the importance of an adequate representation of data in order to achieve a correct interpretation of the information shown.

- Laura Pozueco, Abel Rionda, Alejandro G. Pañeda, José A. Sánchez, Xabiel G. Pañeda, Roberto García, David Melendi and Alejandro G. Tuero. **Impact of on-board tutoring systems to improve driving efficiency of non-professional drivers.** *IET Intelligent Transport Systems*, 2017 (Impacto: 1.194 /Q3/JCR-2016).

Estado: Publicado

Abstract - Efficient driving has been positioned as the most popular alternative to reduce air pollution and obtain fuel savings. However, efficient driving requires a continuous learning process in order to prevent users reverting to their original habits. In order to facilitate the learning process, on-board tutoring systems have appeared. In this paper [25], we analyze in detail the impact of two types of such eco-feedback devices on driver's behavior. The evaluated tutoring systems include information related to the optimal engaged gear, but also related to other safety

and comfort parameters. Our analysis is based on one of the largest and heterogeneous population groups of nonprofessional drivers who have participated in experiments with feedback devices specifically designed to achieve more efficient driving. A total number of 158 volunteers participated in the experiments covering periods of time between 3 and 11 months and using the feedback devices during their daily routine. Results show that, in general, users evolve positively following the eco-driving recommendations throughout the duration of the experiments. In addition, there are significant differences in the use of the tutoring system depending on the type of route, the time of day and other factors such as age or gender.

- José A. Sánchez, Lucía Alonso, David Melendi, Xabiel G. Pañeda, Roberto García. **Collaborative System to Improve Traffic Conditions Based on Fuzzy Logic and Wireless Vehicular Communications in Smart Cities.** *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. (Impacto: 3.724 /Q1/JCR-2016)

Estado: Pendiente de Aceptación

Abstract - Nowadays, the increase in the number of vehicles on the roads has brought about several problems such as an increase in traffic congestion and, consequently, in polluting emissions. These problems are especially severe in urban environments. It is crucial to perform a sustainable urban mobility plan in order to improve the traffic flow and therefore, reduce the negative impacts caused by traffic jams. To this end, this paper presents a smart mobility plan that employs a collaborative driving strategy. Each vehicle tries to infer traffic conditions using its own status and the information shared by other peers. Using a fuzzy logic approach, vehicles perform decisions in accordance with the traffic levels inferred in real time. The designed mobility plan has been tested through a simulation environment, taking into account two types of urban areas in a typical European city. Our approach has increased average speeds by up to 11.20 % and reduced CO₂ emissions by up to 12.27 %. Thus, our results show that the mobility plan has helped to enhance the ability of cars to be able to solve problems caused by traffic congestion and traffic jams.

- José A. Sánchez, David Melendi, Laura Pozueco, Xabiel G. Pañeda and Roberto García. **Feasibility Analysis of the Usage of Head-Up Display Devices and Speech Recognition in Real-Vehicular Environments.** *Universal Access in the Information Society*. (Impacto: 1.219 /Q3/JCR-2016)

Estado: Pendiente de Aceptación

Abstract - Purpose: In recent years, the number of on-board devices that provide information about the vehicle, the driving process and the environment have increased. Nevertheless, these devices can be very distracting. Head-Up Display Devices (HUD) and speech recognition may be good techniques to enrich the

experience of drivers while keeping safety under control. Thus, the purpose of this study is to carry out an evaluation of these techniques under real conditions.

Methods: 50 drivers have participated in a study divided into 2 parts. In the first part, we have performed an evaluation of the usage of driving assistants with HUD devices under real conditions. We have also compared HUDs with conventional HDD (Head-Down Display) screens. Finally, we have also asked users about their opinion on methods of interaction with HUDs. Considering the results, we have carried out a second part aimed at evaluating the interaction with HUD devices using speech recognition.

Results: 65% of the drivers prefer to use HUDs instead of HDDs for safety reasons. Furthermore, the participants prefer to interact with HUDs using voice commands. 86.66% of the users stated that this method of interaction improved their feeling of safety.

Conclusions: The main conclusion is that users agree that driving assistants combined with HUDs are useful and safe at the same time. Moreover, the interaction with HUDs through voice commands is accepted by the majority of the users. It improves their sensation of safety because they do not need to look away from the road to use driving assistants.

- José A. Sánchez, David Melendí, Xabiel G. Pañeda and Roberto García. **Towards Smart Mobility in Urban Areas Using Vehicular Communications and Smartphones.** *IEEE Latin America Transactions*. (Impacto: 0.631 /Q4/JCR-2016)

Estado: Pendiente de Aceptación

Abstract - Nowadays, professional fleets and non-professional drivers pursue to reduce the consumption of fuel and to reduce their travel times. Nevertheless, this may be challenging in urban areas due to the density of traffic. Dense traffic increases travel times and, as a result, the consumption of fuel and the generation of pollution. Thus, it is very important to develop new systems and models that allow us to reduce the negative impacts caused by traffic jams. This paper presents a communication system based on the Wi-Fi Direct technology, in which a conventional smartphone is used to detect and prevent traffic jams in urban areas in real-time. We have developed an autonomous system with commonly available technologies. Our system uses a decision algorithm to determine when a traffic jam occurs (probable and sure), informing other vehicles about this situation. Drivers may act in accordance and change their initial route with the aim of avoiding traffic jams and, consequently, reducing travel times and fuel consumption. Through several field tests in which different conditions have been considered, the results show the feasibility of our system.

1.8.2. Artículos en Congresos

- José A. Sánchez, Laura Pozueco, Xabiel G. Pañeda, Alejandro G. Tuero, David Melendi and Roberto García. **Incorporation of Head-Up Display Devices in Real-Vehicular Environments to Improve Efficiency in Driving.** *Proceedings of the XVII International Conference on Human Computer Interaction*, ACM, 2016.

Estado: Publicado en Actas del Congreso y ACM

Abstract - In the last years the number of devices that provide information about the car the driving process has increased considerably. This also implies an increased level of distraction and, thus, a decrease in safety. In this context, Head-Up Display devices (HUDs) may be considered adequate representation interfaces because they are transparent and they are located in the vision line of the driver. HUDs allow drivers to view what is behind the screen without looking away from the road. However, we must analyze the impact of these devices in order to fully consider them safe in a driving context. In this paper [26], we present an evaluation of HUDs in a real driving context, analyzing different kinds of information. Firstly, we assess the display of efficient driving data gathered from a mobile app. Next, we compare HUDs with conventional devices. Finally, we perform several tests using a GPS assistant, due to the current relevance of these services. A total of 20 non-professional drivers have participated in the experiments. They had to drive vehicles equipped with a HUD display. We evaluate the subjective opinion of the users using questionnaires in order to know whether HUDs are acceptable in a vehicle or not. Results show a positive feedback from users and a high sensation of safety.

Capítulo 2

2 Marco Teórico

El presente capítulo se centra en el desarrollo del marco teórico en el que se fundamenta la presente Tesis Doctoral. Abarca la temática relacionada con las Redes Vehiculares (VANETs), prestando especial atención a la estandarización de las mismas y una revisión de los principales proyectos relacionados. También se realiza un profundo análisis sobre las aplicaciones relacionadas con el mundo de las redes vehiculares, definiendo sus tipos y diferentes usos.

2.1 Estandarización de las Redes Vehiculares

La estandarización y normalización de las tecnologías en general, facilita el proceso de producción y reduce los costes y tiempo que los productos y servicios tardan en llegar al mercado asegurando una rápida implementación y una adecuada interoperabilidad. En el caso concreto de las redes vehiculares, esta estandarización afecta a todas las diferentes capas que conforman la pila de comunicaciones, desde la capa física hasta la capa de aplicación.

En 1999, cuando el Gobierno de los Estados Unidos, representado por la *Federal Communication Commission* (FCC) definió una banda del espectro de radio de 75 MHz de ancho que comprende desde los 5.850 hasta los 5.925 GHz para realizar

comunicaciones dentro de las redes C-ITS, el intento de estandarización de las comunicaciones de corto alcance se incluyó en Norte América como *Dedicated Short Range Communications* (DSRC) [27]. En el caso de Europa, fue el *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) el que hizo lo propio, aunque la configuración de los canales dentro de esa banda fue realizada de forma diferente atendiendo a la definición de 7 canales de 10 MHz en el caso de la FCC (172, 174, 176, 178, 180, 182 y 184) y 5 canales en el caso de la ETSI (172, 174, 176, 178 y 180). Cada uno de los canales definidos tiene un propósito distinto diferenciando claramente en dos tipos de canal: Canales de Servicio (SCH) y Canales de Control (CCH). Estados Unidos y Europa definieron diferentes canales para designar los de control (178 y 180 respectivamente). En ambos casos, el resto de canales eran designados para Canales de Servicio.

Una vez definidos los canales por donde transmitir información y la definición de la modificación de la capa física para conseguir comunicaciones de corto alcance y estandarizado, tanto en Estados Unidos como en Europa el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) decidió expandir la familia de estándares dedicados a las comunicaciones inalámbricas (802.11), añadiendo el estándar 802.11p para dar soporte adecuado en entornos de redes vehiculares a nivel físico y de acceso al medio usando las bandas que contemplaban las comunicaciones de tipo DSRC. El estándar IEEE 802.11p-2010 [28] realiza una adaptación de las capas físicas (PHY) y de acceso al medio (MAC) ya definidas previamente en el documento IEEE 802.11-2007 [29] para cumplir con los requisitos particulares de las redes vehiculares (topología altamente dinámica y altas velocidades de los nodos). Podríamos concluir que está basado en el estándar, ya existente, IEEE 802.11a, al que se le suprime la fase de asociación de pares, además su esquema de QoS está basado en el estándar IEEE 802.11e. En Europa, el estándar 802.11p está considerado dentro del estándar ITS-G5 [30] definido por el ETSI para establecer, de igual forma, las capas PHY y MAC en entornos vinculados a sistemas inteligentes de transporte (ITS).

Cuando hablamos de entornos vehiculares aplicados a redes, es imprescindible hablar de la familia de estándares IEEE 1609 [31] definidos por el IEEE bajo las siglas WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*), que definen una completa arquitectura con los protocolos, servicios e interfaces necesarios para que un nodo de tipo WAVE pueda comunicarse en un entorno vehicular estableciendo comunicaciones V2V y V2I/I2V.

Continuando con la explicación de la pila de protocolos seguida por las arquitecturas dedicadas a las redes vehiculares, una vez definidas la capa física y de acceso al medio, podemos atender a la totalidad de los estándares seguidos por este tipo de redes haciendo referencia a la familia 1609. En este punto, encontramos el estándar encargado de definir los servicios de red y de transporte que debe ofrecer una estación WAVE, el IEEE 1609.3 [32], que se ocupa de realizar el servicio de enrutamiento y direccionamiento de paquetes dentro de la red. Dentro del entorno de la capa de red y transporte, WAVE ha desarrollado un protocolo específico para las redes vehiculares al que llamaron *WAVE Short Message Protocol* (WSMP) o, en español, Protocolo de

Mensajes Cortos WAVE que utiliza mensajes WSM (WAVE Short Messages) para el envío y recepción de datos a través de la red, debido a que la cantidad de bytes de sobrecarga en cada mensaje es muy pequeña (20 bytes de sobrecarga en mensajes WSM, frete a los 52 bytes mínimos de sobrecarga en paquetes UDP/IPv6). Habrá que tener en cuenta que este tipo de mensajes, obvian parcialmente la incorporación de IPv6 a dichas redes dificultando también la integración de servicios basados en IP.

En la Figura 1, podemos observar la pila de protocolos completa basada en WAVE destacando al uso del estándar IEEE 802.11p en las capas Física y MAC y al uso del protocolo WSMP destinado a este tipo de redes.

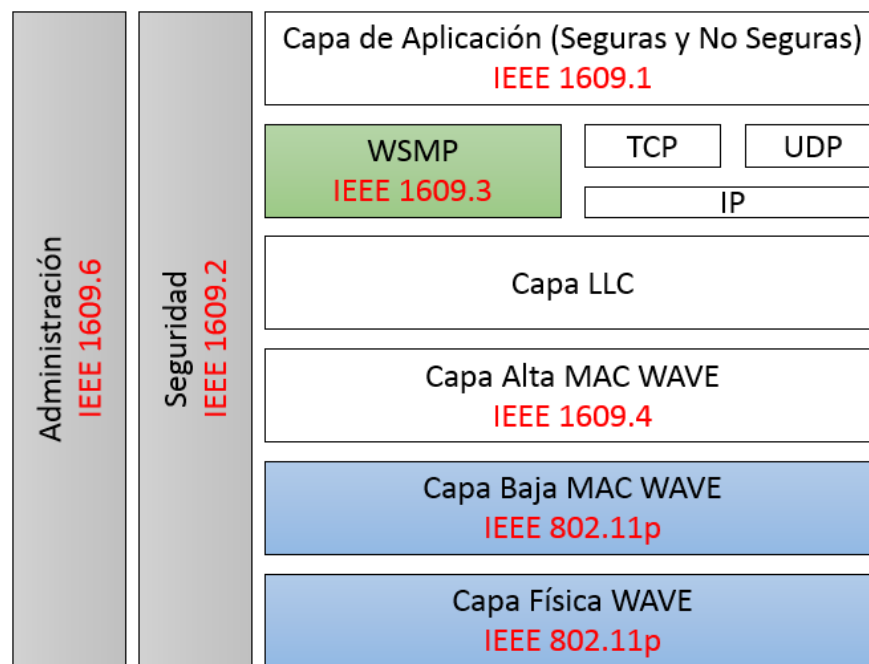


Figura 1. Pila de Protocolos WAVE

La familia de estándares IEEE 1609 define, por tanto, los aspectos ligados a la operación y gestión de la capa de red, transporte y aplicación englobando un conjunto de estándares dedicados a estas tareas y que se definen brevemente a continuación:

- **IEEE 1609.0** [18]: Define la arquitectura general de WAVE, su modelo de comunicación y los mecanismos de acceso al medio.
- **IEEE 1609.1** [19]: Describe el administrador de recursos de los sistemas WAVE que permite a una OBU ejecutar procesos de forma remota.
- **IEEE 1609.2** [20]: Especifica la seguridad de las comunicaciones dentro de un entorno WAVE para aplicaciones y procesos que se ejecutan en las diferentes capas de la pila de protocolos. Los servicios de seguridad que ofrece se agrupan en 2: Servicios de procesamiento seguros y Servicios de gestión seguros.

- **IEEE 1609.3** [21]: Estándar encargado de definir las operaciones de servicios de red y transporte (capa 3 y 4) de la pila de comunicaciones OSI. Soportan comunicaciones inalámbricas entre dispositivos WAVE.
- **IEEE 1609.4** [22]: Este estándar es el encargado de la coordinación de canales, describiendo la operación multicanal que implementa la capa física e incluyendo los parámetros para la priorización de mensajes. Se compone de características para operaciones *OCBEnabled* en su capa MAC especificada en el estándar soporte IEEE 802.11p.
- **IEEE 1609.6** [23]: Grupo de trabajo del estándar encargado de los servicios enfocados a las redes VANET para la gestión remota.

Cabe mencionar que existen otros estándares de la familia IEEE 1609 que dan soporte a otras tareas como los intercambios de información entre unidades de pago electrónico en equipos WAVE (1609.11 [24]) o el estándar encargado de registrar las decisiones de asignación de identificaciones realizadas por el grupo de trabajo IEEE 1609 (1609.12 [25]).

Siguiendo la descripción de capas definidas dentro de la arquitectura de referencia, encontramos la capa de aplicación, donde destaca el estándar J2735 [41], que fue definido recientemente por el SAE (*Society of Automotive Engineers*) en el que se define el formato de mensajes y demás elementos que se usan para intercambiar información con el fin de mejorar la seguridad vial en comunicaciones de tipo V2V y V2I.

Al encontrar en WAVE una arquitectura bastante rígida en el plano de las tecnologías de acceso (solamente contempla 802.11p para comunicar a los nodos de la red), la organización de estandarización *International Standard Organization* (ISO) se propuso como objetivo, el despliegue de una arquitectura más flexible llamada CALM (*Communication Access for Land Mobiles*) que fue desarrollada por los esfuerzos realizados por su grupo de trabajo 16, quedando como una propuesta abierta a cualquier tecnología de nivel físico y de enlace. La ETSI, que estaba más a favor de lo establecido por ISO, aportó posteriormente trabajos que serían integrados en una arquitectura conjunta de referencia, la ISO/ETSI, denominando a los nodos que conforman la red VANET como estaciones ITS de forma genérica.

Dentro de la Unión Europea, la industria del automóvil representada por el *Car to Car Communication Consortium* (C2C-CC) [42], donde participan importantes marcas del mundo del automóvil y el ámbito tecnológico, también desarrolló su propia arquitectura para aplicaciones de seguridad llamada C2CNet (*Car to Car Networking*). Más adelante, la arquitectura C2CNet sería incorporada por el proyecto GeoNet [43] en una arquitectura comprensiva bajo el proyecto COMeSafety [44], explicado con más detalle en la siguiente sección (2.2) y que sería continuado por el proyecto CoMeSafety2 dedicado al fomento de la normalización y armonización de los C-ITS, basado en una

nueva evolución a la que se llamó *Geographical Networking*, que contemplaba tanto comunicaciones V2V haciendo uso de C2C y V2I utilizando IPv6.

Además de las tecnologías destinadas a estandarizar y normalizar las comunicaciones vehiculares y este tipo de redes, surgen las posibles variantes de la familia 802.11 establecidas por el IEEE, siendo pilar fundamental de la presente Tesis el uso de tecnologías alternativas a 802.11p para conseguir la implementación de servicios y aplicaciones que proporcionen comunicaciones vehiculares e intercambio de información útil entre vehículos.

A parte de los estándares establecidos por el IEEE dentro de la familia 802.11, podemos atender al uso de tecnologías establecidas por el 3GPP (*The 3rd Generation Partnership Project*), como por ejemplo, GPRS [45], 3G [46], 4G [47] e incluso tecnologías de reciente aparición y todavía no implantadas de forma amplia, como 5G, para la comunicación de dispositivos [48] que están siendo utilizadas en estudios recientes dentro de entornos de comunicaciones vehiculares [49].

La Figura 2, extraída de [50], muestra, en forma de resumen, las principales arquitecturas desarrolladas en el siguiente apartado y que permiten entender los diferentes puntos de vista de los entornos WAVE, Arquitectura de Referencia ITS (ETSI) basada en GeoNet y Arquitecturas CALM (ISO).

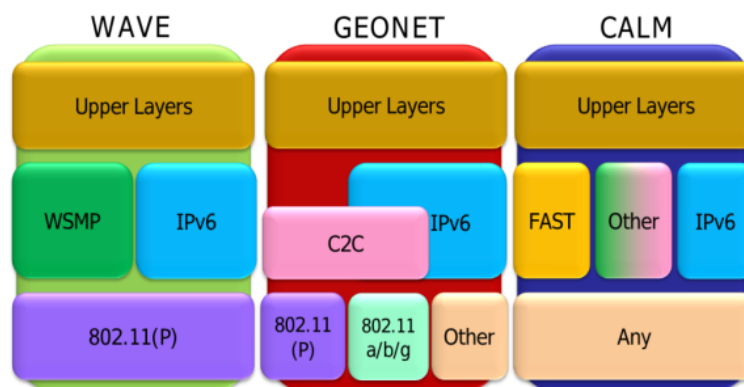


Figura 2. Principales Arquitecturas en Redes Vehiculares [50]

2.2 Proyectos Relacionados con Redes Vehiculares

Debido al auge que las redes vehiculares han sufrido en los últimos años, la cantidad de proyectos y nuevas investigaciones desarrolladas en el campo han sido casi innumerables. Desde hace tiempo, el intento por aunar esfuerzos a la hora de la definición de plataformas que den soporte a las redes vehiculares, así como temas relacionados con las mismas, como la seguridad, han sido objeto de estudio mundial. La Figura 3, extraída de [51], muestra algunos de los proyectos y eventos más significativos en relación con el campo de la I+D dedicada a entornos de redes vehiculares en su evolución histórica.

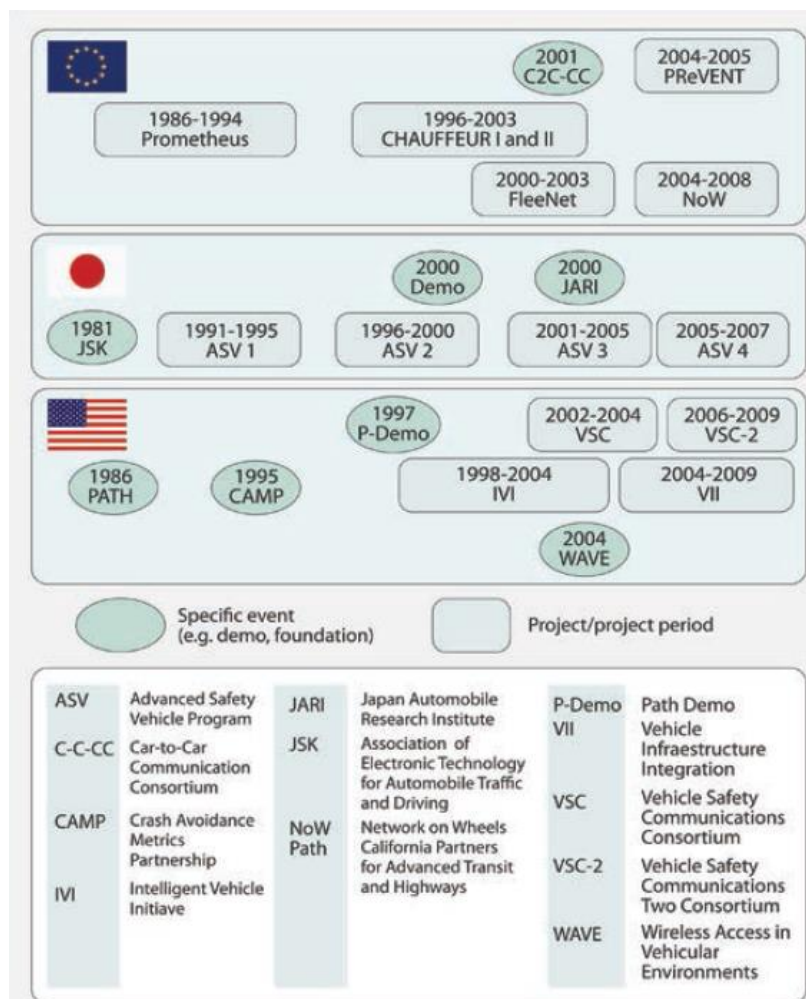


Figura 3. Visión no exhaustiva de los proyectos y eventos relacionados con las redes VANET [51]

Dentro del Marco de la Comisión Europea y desde el C2C-CC, se desarrollaron diferentes proyectos y tareas relacionadas en el ámbito de las comunicaciones vehiculares en entornos C-ITS. A continuación, se destaca el trabajo realizado por algunos de estos proyectos:

- **AdaptIVe** [52]: El proyecto AdaptIVe (*Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles*), es un trabajo de investigación cofinanciado por la Comisión Europea que comenzó en Enero de 2014. El objetivo del proyecto es desarrollar y probar nuevas funcionalidades tanto para automóviles como para camiones que ofrecen una conducción automatizada. Otro de los pilares fundamentales del proyecto es la interacción cooperativa entre el conductor y los sistemas automatizados, que deberá estar habilitada mediante la sensorización del vehículo, tecnologías de cooperación entre vehículos y estrategias adaptativas.

- **DRIVE C2X** [53]: Este proyecto reúne los resultados obtenidos en otros proyectos europeos como *PRE-DRIVER C2X*, *CVIS* o *COOPERS* para crear un sistema de referencia como base para crear pruebas operacionales en Europa. El objetivo es el de permitir la evaluación de tecnologías de conducción cooperativas probando la operatividad de sistemas nacionales para el soporte de despliegues de comunicaciones C2X.
- **COMeSafety** [44]: Este proyecto se basa en la coordinación e integración de resultados obtenidos en otros proyectos europeos sobre comunicaciones vehiculares (tanto V2V como V2I) así como la colaboración en las labores de estandarización de los protocolos usados. Los resultados obtenidos fueron utilizados en su predecesor COMeSafety2.
- **PRESERVE** [54]: El objetivo de este proyecto está basado en la seguridad de las posibles comunicaciones dentro de un entorno vehicular. Se basa en la realización de comunicaciones V2X seguras y protegidas proporcionando y probando un subsistema de seguridad y privacidad. En este caso, el proyecto recopila y amplía los resultados de trabajos de investigación anteriores, integrándolos y desarrollándolos con una mejora en la escalabilidad de los mismos obteniendo una reducción de costos. El objetivo principal, por tanto, será el de ofrecer una completa protección que abarque desde los sensores del vehículo, a través de la red de a bordo y comunicaciones V2V y V2I, hasta la estación receptora de la información transmitida. Como resultado del proyecto, PRESERVE presentó un subsistema de seguridad V2X completo, escalable y rentable cercano al mercado del automóvil y que será integrado en otros proyectos FOT.
- **CVIS** [55]: El proyecto CVIS (*Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems*) fue uno de los primeros en desarrollarse dentro del campo de las comunicaciones vehiculares. Sus objetivos fueron los de diseñar, desarrollar y probar nuevas tecnologías que permitieran que los vehículos se comunicasen entre sí y también con la infraestructura cercana situada en la carretera (RSUs - *Road Side Units*).
- **iTETRIS** [56]: El proyecto iTETRIS (*An Integrated Wireless and Traffic Platform for Real-Time Road Traffic Management Solutions*) desarrolló la evaluación de una plataforma de gran escala atendiendo a simulaciones para aplicaciones de gestión del tráfico de forma cooperativa. La plataforma trataba de ser lo más realista posible combinando la simulación del tráfico y las comunicaciones en un circuito cerrado que permitiera un análisis detallado de los efectos y el rendimiento de los servicios cooperativos sobre el flujo de tráfico, tiempo de viaje, emisiones de los vehículos, etc.
- **EVITA** [57]: Este proyecto versa sobre problemas de seguridad en el tratamiento y transporte de la información dentro de una solución cooperativa para los ITS, teniendo en cuenta la creación de un entorno de comunicación vehicular seguro.

- **OVERSEE** [58]: Continuando en la línea de la seguridad en este tipo de entornos de comunicación, el proyecto OVERSEE (*Open Vehicular Secure Platform*) desarrolló una plataforma de software genérica y estandarizada además de un entorno para el desarrollo de aplicaciones.

En la actualidad, la Unión Europea se está centrando en nuevos proyectos que puedan dar lugar a una mejora considerable de este tipo de entornos. Por ello, como continuación de los Programas Marco, donde hay definidas áreas de interés dentro del sector automovilístico, se ha creado el nuevo *Horizon 2020 (H2020)*, definiendo programas de trabajo dedicados a los sistemas inteligentes de transporte realizando una gran convocatoria de proyectos llamada *Mobility for Growth* [59]. Por tanto, podemos intuir que el incesante interés por parte de las administraciones y entidades privadas en este tipo de nuevas tecnologías, augura un crecimiento en las tareas de investigación y sustenta la motivación de la presente Tesis Doctoral.

2.3 Aplicaciones relacionadas con Redes Vehiculares

En la actualidad, existe una plétora de trabajos e investigaciones relacionadas con las redes vehiculares. El creciente interés que suscita este campo y los beneficios que puede producir tanto para organismos públicos como privados hace que su estudio esté en auge constantemente.

Las aplicaciones relacionadas con el mundo de las VANETs (ubicadas en la parte más alta de la pila de protocolo desarrollada en secciones anteriores) están basadas en 4 grandes grupos: Aplicaciones de Seguridad, Aplicaciones Comerciales, Aplicaciones para la Mejora del Confort y Aplicaciones Productivas [60].

2.3.1. Aplicaciones de Seguridad

Las aplicaciones de seguridad componen una de las bases de la motivación del desarrollo de redes vehiculares ofreciendo a la comunidad nuevos sistemas de previsión de accidentes, información del tráfico en tiempo real, etc. Este tipo de aplicaciones se pueden clasificar en:

- **Aplicaciones de Tráfico en Tiempo Real:** Este tipo de aplicaciones están destinadas al almacenamiento en tiempo real del tráfico en ciudad pudiendo identificar posibles atascos o zonas conflictivas por contaminación u otros agentes y compartiendo la información con el resto de nodos de la red.
- **Aplicación de Transferencia de Mensajes Cooperativos:** Este tipo de intercambio de mensajes están destinados a sistemas cooperativos que permiten ayudar a otros vehículos.
- **Aplicaciones de Notificación de Accidentes:** Este tipo de aplicaciones otorgan a los usuarios de la red una consciencia plena sobre el estado de la vía informando de un accidente (que fue notificado por el vehículo involucrado).

De esta forma, el usuario puede adecuar su forma de conducir adaptándola a las condiciones de la vía.

- **Aplicaciones para la Notificación de Control de Riesgos:** Este tipo de aplicaciones está destinada a la notificación entre vehículos de situaciones de posible riesgo en carretera, por ejemplo, curvas muy cerradas, cuestas abajo repentinas, deslizamientos en carretera, etc.
- **Aplicaciones para la Advertencia de Accidentes Cooperativas:** Aplicaciones destinadas a los conductores de vehículos que informan de un posible accidente pudiendo reaccionar a tiempo para cambiar su ruta [61]. Esta es una de las aplicaciones más fuertes en el ámbito del desarrollo de aplicaciones permitiendo la reducción sustancial de los accidentes en carretera. Artículos recientes como los desarrollados por M Bhatt et al. [62] o M. I. Mushtaq y M. Kansal [63], e incluso patentes [64] están relacionados con diferentes sistemas de advertencia de accidentes en redes vehiculares. La Figura 4, extraída de [60], muestra un claro ejemplo de una posible comunicación entre diferentes vehículos cuando se produce una incidencia en ciudad. De esta forma, todo el entorno en el que ha ocurrido tendrá constancia de la nueva situación de la carretera.

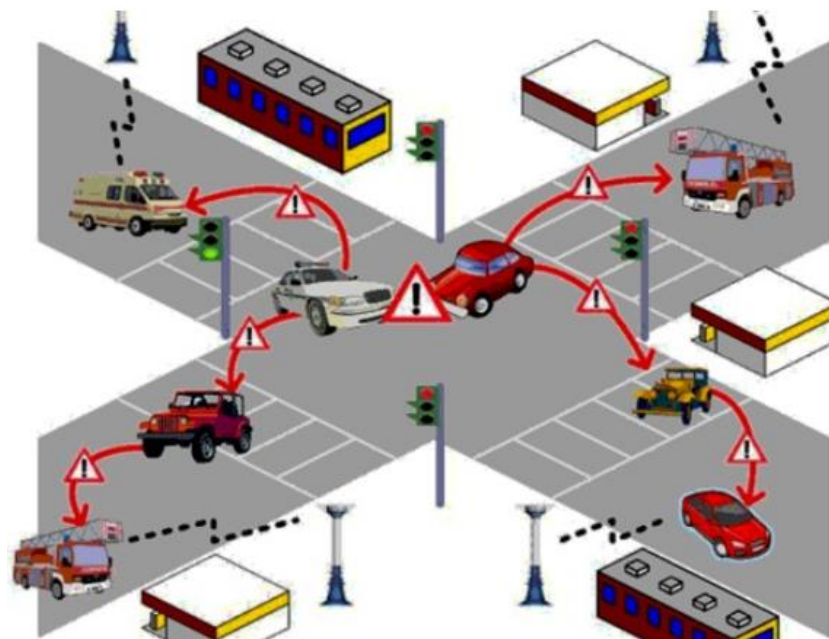


Figura 4. Notificación de Situación de Emergencia [60]

- **Aplicaciones para la Vigilancia del Tráfico:** Aplicaciones para la vigilancia del tráfico como la instalación de cámaras en las RSU que pueden transmitir información en tiempo real para proporcionar una visión general de la vía.

2.3.2. Aplicaciones Comerciales

Esta categoría de aplicaciones está enfocada a los servicios ofrecidos por terceros que generan ingresos para la empresa que los proporciona. Dentro de este tipo encontramos aplicaciones de entretenimiento y servicios como el acceso web, *streaming* de vídeo y audio, etc. Entre las posibles aplicaciones comerciales podemos encontrar:

- **Aplicaciones para el Diagnóstico Remoto del Vehículo:** Este tipo de aplicaciones puede ser usado para el envío/recepción de información relativa al vehículo para proceder, por ejemplo, a realizar un informe de estado. Una posible aplicación sería enviar de forma automática la información relativa al vehículo a una RSU que almacena en un servidor externo (en Internet) el estado del vehículo para su posterior procesamiento y presentación.
- **Aplicaciones para el Acceso a Internet:** Mediante el uso de este tipo de aplicaciones, los vehículos podrán acceder a internet a través de, por ejemplo, una RSU que ofrezca servicios de conexión a internet (actuando como *router*).
- **Aplicaciones de Navegación GPS:** Una de las aplicaciones más importantes dentro de los entornos vehiculares es el de la navegación GPS usada por una gran cantidad de usuarios en la actualidad. Aplicaciones como la descarga digital de mapas o la incorporación de datos en tiempo real sobre el estado de la vía pueden ser muy útiles.
- **Aplicaciones para la Visualización de Vídeo en Tiempo Real:** Este tipo de aplicaciones comerciales permiten al usuario que las usa acceder a contenido multimedia relacionado con el vídeo pudiendo acceder bajo demanda a los contenidos deseados.
- **Aplicaciones para la Visualización de Anuncios (Valor Añadido):** Dentro de este tipo de aplicaciones podríamos enmarcar las aplicaciones destinadas a la diseminación de publicidad o anuncios en los vehículos por parte de las empresas, incluso sin el acceso a los servicios ofrecidos por internet.

2.3.3. Aplicaciones para la Mejora del Confort

Este tipo de aplicaciones están enfocadas a ofrecer información al usuario para que pueda mejorar su nivel de confort dentro del periodo de conducción. Entre los principales tipos de aplicaciones destinadas a la mejora del confort encontramos:

- **Aplicaciones para Selección de Ruta:** La planificación de viaje por carretera puede sufrir modificaciones debido a congestiones del tráfico o estados inesperados de la vía resultado de posibles accidentes u otros eventos. En este caso, aplicaciones que determinen la ruta óptima entre un punto de partida y

destino teniendo en cuenta las condiciones de la vía, puede mejorar la situación del tráfico y por tanto del tiempo de viaje y de exposición del vehículo en carretera.

- **Aplicaciones para el Pago Electrónico de Peajes:** A efectos de agilizar el proceso de pago de peajes, la comunicación directa entre el vehículo y la infraestructura debe ser necesaria. A pesar de que ya existen métodos que dan agilidad al proceso de pago de peajes, como el “*Telepeaje*” en España [65], podemos aplicar el concepto de comunicación vehicular donde las OBU de los vehículos, a través del GPS de a bordo pueden determinar en un mapa digital la ruta que seguimos y pagar en consecuencia de forma rápida y sin detenciones.
- **Aplicaciones para la Disponibilidad en Parkings:** Una tarea muy común y en la que, en muchas ocasiones, se pierde mucho tiempo cuando conducimos es el estacionamiento del vehículo. Aplicaciones que informen a los vehículos de posibles aparcamientos en ciudad puede disminuir considerablemente el tiempo que emplean los conductores en la búsqueda de un hueco libre, disminuyendo el tiempo de exposición del vehículo en la vía y consiguiendo, de este modo, que el automóvil emita una cantidad de gases contaminantes menor.
- **Aplicaciones de Predicción Activa:** Una predicción de las condiciones de la carretera, por ejemplo, el conocimiento por parte del vehículo de la topografía de la misma, puede mejorar la eficiencia en la conducción e incluso llegar a ahorrar combustible.

2.3.4. Aplicaciones Productivas

Las aplicaciones denominadas “productivas” son adicionales a las anteriores que son diseñadas con el fin de producir un beneficio a los usuarios y a la sociedad. Entre ellas podemos encontrar:

- **Aplicaciones para el Beneficio Medioambiental:** Programas de investigación dedicados al beneficio medioambiental como AERIS [66], trabajaron (desde 2009 hasta 2014) en avances relacionados con el denominado “*Green transportation*” atendiendo a la generación y adquisición de datos medioambientales en tiempo real y empleando un enfoque multi-modal que permite transmitir esta información a través de comunicaciones vehiculares (V2V) tratando de mitigar algunos de los efectos negativos derivados del transporte.

- **Aplicaciones para la Optimización de Tiempos:** Este tipo de aplicaciones está destinado al empleo de tiempos de inactividad dentro del vehículo (por ejemplo, la espera de algún pasajero). Al tener la capacidad de acceso a internet y otras funcionalidades propias de las redes VANET, el usuario que tenga conectividad en su vehículo (bien con otros vehículos o bien con la infraestructura que proporciona servicio a internet) puede utilizarlo en su beneficio y atender tareas como la atención al correo electrónico, la planificación semanal en formato digital, etc.
- **Aplicaciones para el Ahorro de Combustible:** Existen muchas aplicaciones que provocan un ahorro considerable de combustible y por tanto una menor contaminación de la ciudad. Aplicaciones destinadas a la agilización del proceso de pago en peajes, la selección de rutas adecuadas en función del estado de la carretera o el informe de estacionamiento libre en ciudad, que han sido explicadas anteriormente, pueden contribuir ampliamente en este contexto, encontrando grandes cantidades de ahorro de combustible. En este sentido, muchas aplicaciones, como la desarrollada en el estudio [67], que propone una aplicación basada en la navegación para el ahorro de combustible usando redes VANET y consiguiendo unos resultados destacables con un 20% de ahorro de combustible, pueden ser aplicadas dentro de los ITS.

Capítulo 3

3 IEEE 802.11p y Simulación de Redes Vehiculares

Como ya expusimos en el Capítulo 2, la estandarización de las tecnologías dedicadas a las redes vehiculares fue desarrollada con el fin de poder utilizar modelos adecuados para el intercambio de información en este tipo de entornos. Fue entonces cuando surgió el estándar IEEE 802.11p que, junto con la familia de estándares WAVE (1609), prometían cumplir con los requisitos particulares de las redes vehiculares, como la alta velocidad de los nodos y la existencia de una topología altamente dinámica, aunque conocida.

A pesar de que diversos estudios recientes donde se realiza el despliegue de una red vehicular en vías rápidas usando IPv6 [68] u otros que trabajan sobre los momentos de transferencia de servicios de una estación base a otra (*handovers*) en redes vehiculares [69], emplean de forma real tecnologías basadas en 802.11p para realizar estudios experimentales, la implantación de la tecnología a nivel comercial es un hito que todavía no se ha logrado debido al alto coste que conlleva y a los problemas de seguridad vial que puede provocar.

Por ello, el presente capítulo, explica en profundidad el estándar 802.11p. Este protocolo está destinado a redes vehiculares. Por otro lado, se realiza una amplia revisión sobre los entornos de simulación empleados para desplegar redes VANET. Finalmente, se presenta un caso de estudio acerca del uso de comunicaciones vehiculares mediante el intercambio de información de video bajo el estándar de codificación H.265 haciendo uso de la integración de diferentes simuladores aplicados el campo de las redes vehiculares 802.11p.

3.1 Estándar IEEE 802.11p

Ante la demanda de una alta movilidad, la cobertura geográfica y el alto grado de variabilidad en la topología de las redes vehiculares, se hace necesaria la elección de un protocolo y/o estándares de forma adecuada que estén destinados a la definición de las comunicaciones vehiculares se hace necesaria.

A tal efecto, en el Año 2004 se consolidó el grupo de trabajo IEEE TFp (Task Force p) con el objetivo de especificar una arquitectura de comunicación en entornos vehiculares basada en la tecnología inalámbrica para redes IEEE 802.11. Fue en ese momento, cuando surgió el estándar 802.11p. Más adelante el grupo de trabajo IEEE 1609 desarrolló un conjunto de especificaciones de las capas de red, transporte y aplicación para las comunicaciones vehiculares como tales (como se explicó en el Capítulo 2).

3.1.1. El Estándar 802.11

La especificación IEEE 802.11 presenta un estándar internacional que define las características de una red de área local inalámbrica (WLAN). Este estándar, establece los niveles inferiores del modelo OSI para las conexiones inalámbricas que utilizan ondas electromagnéticas. Comenzó a usarse en 1997, tras seis años de proceso de creación, proponiendo velocidades de entre 1 y 2 Mbps y un sistema de cifrado WEP (*Wired Equivalent Privacy*), operando en la banda de frecuencia de 2,4 GHz.

Fue en septiembre de 1999 cuando salen a la luz varios estándares con diferentes propósitos: el IEEE 802.11b que ofrecía 11Mbps o el IEEE 802.11a con una velocidad de 54Mbps. A partir de la aceptación de estos protocolos (sobre todo del 802.11b), se empezaron a desarrollar nuevas versiones mejoradas hasta el punto de disponer, en la actualidad, de numerosos estándares sobre la base de 802.11. Entre ellos podemos encontrar, 802.11Legacy/a/b/g/n/y, aprobados por el IEEE, y otros tantos que aún no han sido aprobados (aunque si definidos). Todo ello, teniendo en consideración el dedicado a los entornos de redes vehiculares: el IEEE 802.11p.

3.1.2. DSRC y 802.11p

El acrónimo DSRC viene definido por *Dedicated Short-Range Communications*, que nos servirá para las comunicaciones dedicadas de corto alcance. El espectro de banda que se define para el estándar IEEE 802.11p es el de 5,9 GHz dedicado al uso exclusivo de las comunicaciones vehiculares con intercambios de información de tipo DSRC.

En este sentido, DSRC pretende proporcionar altas tasas de transferencia de datos en circunstancias donde sea necesario aislar zonas pequeñas y reducir al mínimo la latencia en la comunicación. Como ya hemos dicho anteriormente, estas comunicaciones utilizarán un ancho de banda de 5,9 GHz, teniendo un alcance de transmisión reducido que variará con respecto a las condiciones que encontremos en el entorno. La tasa de transmisión va desde 6 Mbps a 27 Mbps, siendo de 18 Mbps la empleada para las comunicaciones entre vehículos. Esta tecnología también está basada en la capa física (PHY) de IEEE 802.11p y soporta tanto comunicaciones punto a punto, como comunicaciones de tipo *broadcast*.

El uso de este tipo de comunicaciones tiene dos principales vertientes que son: la de Seguridad Vial, teniendo para ello, un sistema de alerta de emergencias a vehículos, prevención de accidentes, etc. y las transacciones comerciales e información de viaje, por ejemplo, el pago automático de servicios en autovías, información sobre el tráfico en tiempo real, etc.

3.1.3. Capas de Operación de 802.11p

El protocolo 802.11p opera sobre las capas inferiores del modelo: Capa física (PHY) y Capa de Acceso al Medio (MAC), con el fin de poder realizar comunicaciones vehiculares mediante este protocolo y así proceder al intercambio de información entre vehículos. Se debe comentar que la información adicional, que actúa sobre la parte superior de la capa MAC, operará también con el estándar IEEE 1609 para poder realizar operaciones multicanal dentro de la misma estructura.

3.1.3.1 Capa Física (PHY Layer)

El estándar 802.11-2007 define tres modos diferentes de capa física atendiendo a la frecuencia. Está compuesto por bandas de 20MHz, de 10MHz y de 5MHz. Estas frecuencias son usadas de forma distinta dependiendo del uso al que estén destinadas. Por ejemplo, 802.11a suele utilizar un ancho de banda de 20MHz mientras que 802.11p trabaja con el de 10MHz. Al igual que el protocolo IEEE 802.11a, el estándar IEEE 802.11p utiliza la transmisión multiportadora OFDM.

Haciendo uso de la señal de 802.11 con el muestreo reducido de la tasa de velocidad de reloj, la señal deseada de 802.11p se puede conseguir en la capa física.

Esto afectaría a los siguientes parámetros:

- Ancho de Banda (*Bandwidth*): En el estándar IEEE 802.11p el ancho de banda es de 10MHz, con el fin de hacer las señales más robustas. El ancho de banda de 20MHz también está implementado, pero en esta ocasión, solo de forma opcional.

- Portador de Separación (*Carrier Spacing*): El 802.11p utiliza un espaciado reducido a la mitad comparado con 802.11a.
- Longitud de Símbolo (*Symbol Length*): La longitud de cada símbolo se duplica, por lo que la señal es más fuerte y robusta.
- Frecuencia (*Frequency*): La banda de frecuencia es la de 5.9GHz, que ya ha sido reservada por la Comisión Europea para la comunicación vehicular; la idea final es que, aunque en Estados Unidos la frecuencia no sea exactamente la misma (siendo muy parecida), sí se pueda utilizar la misma antena y transmisor/receptor para la realización de las comunicaciones vehiculares.

En la Tabla 2 se muestra una comparativa de los estándares 802.11a y 802.11p en uso de la capa a más bajo nivel (Capa Física):

Parámetros	IEEE 802.11a	IEEE 802.11p	Cambios
Bit rate (Mbit/s)	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27	Mitad
Modulation mode	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	No Cambios
Code rate	1/2, 2/3, 3/4	1/2, 2/3, 3/4	No Cambios
Number of subcarriers	52	52	No Cambios
Symbol duration	4 μ s	8 μ s	Doble
Guard time	0.8 μ s	1.6 μ s	Doble
FFT period	3.2 μ s	6.4 μ s	Doble
Preamble duration	16 μ s	32 μ s	Doble
Subcarrier spacing	0.3125 MHz	0.15625 MHz	Mitad

Tabla 2. Diferencias entre la capa física del estándar 802.11a y 802.11p

3.1.3.2. Capa de Acceso al Medio (MAC Layer)

En esta capa, al igual que en la física, se produce una modificación con respecto al estándar 802.11-2007, estando diseñada para ser independiente de la capa física.

Tanto la capa MAC, como la capa PHY, incluyen conceptualmente, entidades de gestión. Dentro del estándar 802.11p, existe un nuevo mecanismo basado en gestión de información (MIB), que está definido dentro de esta capa. Las opciones que presenta esta capa se basan en que:

- No hay servicio de autenticación, que será proporcionado por parte de un sistema de gestión de entidades (SME) o por aplicaciones fuera de la subcapa MAC.
- No hay servicio para dejar de estar autenticado.
- Proporciona confidencialidad de los datos.

Como las estaciones se definen inicialmente como V2V (a priori), tendremos un conjunto de servicios básicos independientes (IBSS). Esto se resolvería atendiendo a los canales reservados que también se utilizan para la seguridad y eficiencia de las aplicaciones del tráfico. Por lo tanto, no es necesaria la búsqueda de canales, porque ya dedica algunos predefinidos para la difusión de información en diferentes categorías.

El propósito de la capa MAC queda reducido a establecer los mecanismos de acceso al canal de comunicación, de tal forma que un conjunto de estaciones puede compartir el medio inalámbrico de forma eficiente. El estándar IEEE 802.11p define el uso de la CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*) para las comunicaciones V2V y V2I. Merece la pena mencionar que, la capa de acceso al medio, también considera aspectos de transmisión como la probabilidad de recepción de paquetes, el tiempo de acceso al canal, la prioridad de los mensajes y el control de la gestión.

3.1.4. Descripción del estándar IEEE 802.11p

Como ya explicamos en Capítulos anteriores, el estándar IEEE 802.11p define una estructura de red compuesta por nodos de red que podrán ser de dos tipos:

- **OBU**: Unidad de abordo (*On-Board Unit*), que representa un vehículo equipado con radio de comunicación de corto alcance (usando DSRC).
- **RSU**: Que representa un dispositivo (*Road-Side Unit*), con radio DSRC situado, por ejemplo, al borde de una carretera. A pesar de tener una interfaz de comunicación de corto alcance, este tipo de dispositivos pueden tener otras interfaces de comunicación para tener acceso a otro tipo de redes, por ejemplo, Internet.

Como se explicó anteriormente, el protocolo 802.11p está basado en el estándar 802.11-2007 de IEEE para la mejora de las redes basadas en CSMA/CA (protocolo de control de bajo nivel que nos permite que múltiples estaciones utilicen un mismo medio de transmisión de información). Este protocolo es el que se está aplicando actualmente a entornos vehiculares.

Mediante el uso de la tecnología DSRC, se permite el intercambio de información tanto entre vehículos (V2V), como entre vehículos e infraestructuras (V2I – I2V). Esta

especificación se usa como apoyo para los ITS. El modo WAVE nos presenta pues, la operación de dispositivos basados en 802.11 en entornos donde las propiedades de la capa física cambian rápidamente y donde se requerirán intercambios de comunicación con duraciones cortas.

El estándar IEEE 802.11p soporta la transmisión de paquetes IP y también de mensajes cortos WAVE (WSMs), ya que el estándar IEEE 1609.3 define un protocolo para la capa de red VANET denominado Protocolo de mensajes cortos de WAVE o WSMP. Los mensajes enviados por WSMP son denominados Mensajes Cortos de WAVE o WSM. Este tipo de mensaje es usado para el intercambio de información a través de una red vehicular debido a que la cantidad de bytes de sobrecarga en cada mensaje es pequeña (20 bytes de sobrecarga, frente a los 52 bytes mínimos de sobrecarga en paquetes UDP/IPv6).

Los mensajes WSM contienen información asociada a la transmisión de datos, incluyendo: Versión del protocolo WSMP, Identificador de proveedor de servicios, PSID, Velocidad de los datos, Potencia de transmisión y Número de canal.

Por otro lado, el estándar tiene operación multicanal, ya que, una de las funciones de la capa de acceso al medio, consiste en la priorización de mensajes generados por aplicaciones de seguridad (sensibles a retardos elevados). Con el propósito de coordinar los diferentes tipos de mensajes, 802.11p establece un esquema de acceso al canal mejorado llamado EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*), que especifica cuatro modos de acceso, cada uno asociado a un canal independiente y con una prioridad diferente.

La Figura 5 (extraída de [70]), muestra los canales definidos para el estándar 802.11p y de los que hará uso el mismo, dependiendo de la aplicación o servicio que se esté ofreciendo.

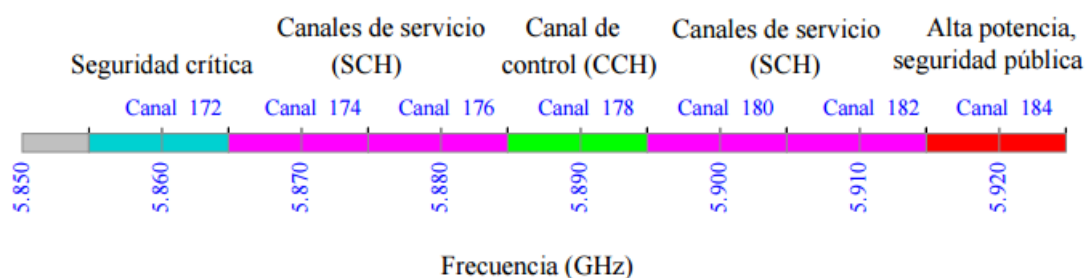


Figura 5. Clasificación de Canales [70]

Como vemos en la Figura 5, existen dos tipos de canales, que son: canal de control (CCH) y canal de servicio (SCH):

- Canal de Control (CCH, *Control Channel*): Es un canal de radio fijo y usa comunicación tipo *broadcast*. Está dedicado a la comunicación de paquetes de alta prioridad y baja latencia. Por tanto, las aplicaciones de seguridad críticas hacen uso de él, siendo también utilizado para la propagación de mensajes de control de red.
- Canal de servicio (SCH, *Service Channel*): Este canal de comunicación es bidireccional (entre la OBU y RSU). El canal de servicio es usado por aplicaciones específicas y éstas pueden ser ejecutadas en paralelo en diferentes canales de este tipo. Es necesario el establecimiento de un conjunto de servicios denominados WBSS (*WAVE Basic Service Set*) que establezca la comunicación ad hoc entre las unidades (OBU y RSU).

Como podemos observar sobre la Figura 5, el IEEE 802.11p define 7 canales de 10MHz cada uno. Tendremos un canal de control (CCH) y, por otro lado, los canales de servicio (SCH), que se utilizarán para la propagación de los servicios prestados en la red propuesta. El ancho de banda que utilizamos es dividido en ciclos para transmitir.

Debemos tener en cuenta, que para el caso de intercambio de mensajes del tipo V2V deberemos tener nodos en la red (en nuestro caso vehículos), que deben comportarse como red Ad-hoc. Estos nodos llevarán una OBU con los interfaces de comunicación adecuados incorporando interfaz de comunicación 802.11p para poder comunicarse. El objetivo de este estándar será el de definir un conjunto mínimo de especificaciones, que aseguren la interoperabilidad entre dispositivos inalámbricos en entornos vehiculares con cambios impredecibles y situaciones donde el intercambio de mensajes debe realizarse en tiempos cortos, incluso más cortos que en los especificados en redes ad-hoc basadas en 802.11. El motivo radica en que los nodos serán vehículos con velocidades elevadas y la topología de la red vehicular será altamente dinámica.

3.2 Simulación de Redes Vehiculares

La simulación de las VANET ha supuesto un hito muy importante en la investigación de este tipo de redes. Al no disponer de capacidad lógica ni física para el despliegue de redes VANET en entornos reales, se hace fundamental el uso de entornos simulados que puedan ofrecer resultados fiables sobre la implementación de este tipo de tecnología y que posteriormente, se espera, puedan ser extrapolados a un entorno real.

3.2.1. Introducción a la Simulación en VANETs

Como se ha mencionado en secciones anteriores, las redes VANET, a diferencia de las MANETs (*Mobile Ad hoc Networks*), no se ven limitadas por la duración de sus baterías, ya que, el propio vehículo es quien la carga mientras está en funcionamiento. Además de esto, hay que tener en cuenta las particularidades que presentan las redes en las que están involucrados los vehículos. En este caso, habrá que prestar atención a la alta movilidad de los nodos y el gran cambio de topología que sufre la red. Pese a estas

características especiales encontramos que su movimiento y densidad no sigue un patrón aleatorio, sino que, debido a que circulan por carreteras, podría predecirse. Todo ello facilita la detección de estructuras escalables y clústeres, lo cual repercute directamente y de forma positiva en el rendimiento de la red [71].

Una de las principales desventajas en el estudio de este tipo de redes tiene que ver con su despliegue en entornos reales. En primer lugar, cabe señalar que el coste de la tecnología es muy elevado, debiendo adquirir gran cantidad de dispositivos que cuenten con las interfaces de comunicación y equipos de tratamiento de información adecuados. En segundo lugar, la problemática de la seguridad en carretera se hace patente cuando se quieren realizar despliegues a gran escala de este tipo de redes. Por otro lado, merece la pena mencionar que todavía queda un largo camino por recorrer en cuanto a la implementación de protocolos de *routing* y aplicaciones en los equipos que se utilicen para el desarrollo de grandes pruebas. Por último, la temática relacionada con la seguridad en las comunicaciones dentro de este tipo de redes es muy importante debiendo definir protocolos de comunicación seguros. La línea de investigación actual en este campo se está convirtiendo hoy en día en una de las más relevantes dentro de las redes VANET, teniendo en artículos de reciente publicación [72], [73] o [74], una gran fuente de conocimiento sobre el tema.

Atendiendo a la problemática explicada anteriormente, la simulación se presenta, por tanto, como una alternativa que permite estudiar el tránsito y las comunicaciones de las redes VANET, sin necesidad de tener que invertir una gran cantidad de dinero en la compra de dispositivos dedicados y tiempo en el despliegue de la red. Debido a ello, en la actualidad, la simulación es utilizada para el desarrollo de protocolos de encaminamiento en este tipo de redes, el despliegue de servicios y aplicaciones dedicadas, así como para la validación y mejora de los modelos analíticos para redes VANET.

3.2.2. Modelos de Movilidad y Tipos de Simuladores

El diseño e implementación de un modelo de movilidad dentro de un entorno de simulación se presenta como eje fundamental a la hora de simular una red vehicular. Por tanto, deberemos definir, con la máxima similitud posible, el comportamiento real del tráfico.

Resulta complicado que un simulador sea capaz de reproducir realmente el comportamiento de una red VANET debido a la gran cantidad de parámetros que incluyen en el movimiento y conectividad de los nodos. Teniendo en cuenta esto, habría que atender a diferentes parámetros como las aceleraciones y deceleraciones de los vehículos, la cantidad de tráfico, el movimiento tanto de peatones como de vehículos (en entornos urbanos) y otros parámetros que moldean el contexto de la red como las condiciones climatológicas, la aparición de atascos, retenciones o accidentes en carreteras, e incluso, micro-variables como el deslumbramiento de un conductor por las luces de otros vehículos o su estado de ánimo. Teniendo en cuenta esto, resulta

fundamental la definición de un modelo de movilidad que tenga en consideración el mayor número de parámetros posible.

Dependiendo del enfoque que se utilice en la simulación de redes VANET para dotar de un modelo de movilidad a la simulación pueden existir diferentes categorías, encontrando: Modelos Macroscópicos, que consideran las limitaciones de tráfico como carreteras, calles o cruces únicamente o Modelos Microscópicos donde se tiene en cuenta el movimiento de cada vehículo y la forma de interactuar con el resto. Esta categorización resulta insuficiente a la hora de describir un modelo de movilidad adecuado por lo que suele hablarse de dos bloques funcionales independientes: El Simulador de Tráfico (*Traffic Generator*) y el modelo de movilidad (*Motion Constraints*). El primero de ellos se encarga de describir el movimiento de los vehículos teniendo en cuenta las carreteras, mientras que el segundo se encarga de explicar las interacciones entre vehículos, para lo que tiene en cuenta las características del escenario que es objeto de estudio.

Por todo lo explicado anteriormente, la definición del modelo de movilidad debe ser preciso y realista recogiendo los aspectos más importantes que se desarrollan en el estudio realizado por J. Harri et al. [75], donde encontramos parámetros relacionados con: Mapas topológicos precisos, aceleraciones y deceleraciones de los vehículos, obstáculos en vías, puntos de interés (como origen y fin de rutas), tiempo de simulación, distribución de los vehículos no aleatoria y patrones de conducción inteligentes (aplicados a la movilidad).

Haciendo referencia a la consideración de los parámetros definidos anteriormente, encontramos una clasificación de modelos de movilidad que atienden a: *Stochastic models* que describen el movimiento de sus nodos de forma aleatoria, *Traffic Stream Models*, que describen el tráfico como si fuese un fenómeno hidrodinámico mediante las tres variables fundamentales: velocidad, densidad y flujo, *Car Following Models* donde el movimiento de cada conductor se describe en relación con el vehículo que le precede, *Queue Models*, que utiliza la teoría de colas para describir el tráfico de manera que cada carretera se modela como una cola FIFO y cada vehículo actúa como cliente y por último, *Behavioral Models*, donde cada movimiento viene determinado por reglas conductuales, decisiones racionales o acciones secundarias en un proceso de acción-reacción [57].

Otra posible clasificación de modelos de movilidad se puede realizar en referencia al tratamiento de información que estos hacen, teniendo: Modelos Sintéticos, Modelos Basados en Trazas, Modelos Basados en Encuestas y Modelos Basados en Simuladores de Tráfico. En este caso, los modelos basados en encuestas, intentan agrupar aquellos que buscan incluir el comportamiento no aleatorio de los vehículos en el mundo real mediante el uso de patrones que reflejan el comportamiento social obtenido gracias a la realización de encuestas. Por otro lado, los modelos basados en trazas, utilizan medidas recogidas en entornos reales que permiten desarrollar patrones de movimiento de los vehículos presentando la problemática relacionada con la aparición de nuevos patrones de tráfico al estar resolviendo patrones de tráfico pasados.

Es a partir de los modelos sintéticos y mediante el uso de la validación que utilizan para la obtención de información mediante encuestas y escenarios reales donde se desarrollan los simuladores de tráfico. Esta clase de modelo es capaz de modelar el tráfico microscópico teniendo en cuenta factores como la contaminación ambiental o el nivel de ruido.

Para entender bien los modelos de movilidad y la implementación de la simulación dentro de las redes vehiculares, explicamos a continuación los tipos de simuladores existentes en el campo.

3.2.2.1. Simuladores de Red

Para conseguir la implementación adecuada de los modelos de movilidad descritos en la sección 2.4.2 es necesaria la integración de los simuladores de tráfico y los simuladores de red. Sin embargo, conseguir que este tipo de simuladores trabajen de forma conjunta no siempre es sencillo porque no han sido diseñados para ello. Desde el punto de vista de los simuladores de red, los modelos de movilidad se veían como perturbaciones aleatorias en su configuración [77]. Para resolver este problema, los simuladores de red se pueden clasificar en 3 grandes grupos: Aislados, Integrados e Híbridos.

Simuladores Aislados

Los simuladores aislados son los primeros que propusieron que los modelos de movilidad actuaran de forma conjunta con los simuladores de red permitiendo a estos últimos cargar escenarios de movilidad. La Figura 6 muestra la integración del generador de tráfico y del simulador de red.

Este tipo de simuladores trabajan con escenarios obtenidos de simuladores de tráfico o modelos de movilidad complejos que han de ser generados previamente. Posteriormente, estos escenarios deben ser cargados en formato de traza predefinido en el simulador de red, obteniendo una comunicación de información de forma unidireccional y no permitiendo la realización de cambios en el escenario de movilidad inicial. A pesar de la problemática que presenta el no poder producirse una interacción directa entre el simulador de red y el modelo de movilidad inicial, tienen la ventaja de que pueden evolucionar de forma independiente al no tener en cuenta la configuración previa de cada uno de ellos.

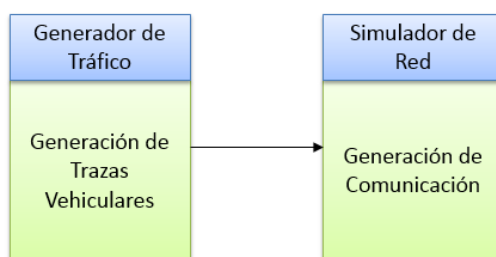


Figura 6. Simuladores Aislados

Simuladores Integrados

A la vista de los problemas presentados en la interacción entre simuladores de red y generadores de tráfico (con modelos de movilidad) en el caso de los simuladores aislados, los simuladores integrados dan un paso más en la evolución optando por la sustitución de ambos en un simulador más sencillo de tipo *off-the-shelf* que es usado por algunos estudios para conseguir una aproximación al estándar IEEE 802.11p (dedicado a las capas bajas de los entornos vehiculares) [78]. De este modo, se intenta conseguir la colaboración mutua entre el generador de tráfico y el simulador de red a expensas de no utilizar pilas complejas de protocolos.

En la Figura 7, se observa un esquema simple de la configuración de este tipo de simuladores atendiendo al sistema bidireccional que se usa para la interacción entre ambos.

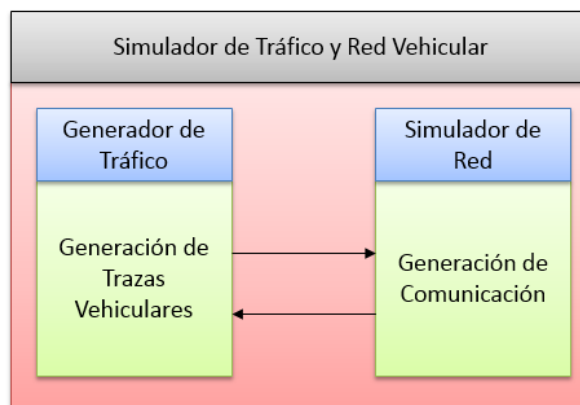


Figura 7. Simuladores Integrados

La mayor desventaja de este tipo de simuladores es la baja calidad del simulador de red que hace que su uso sea limitado en entornos de redes VANET, ya que, son incapaces de reproducir el comportamiento de los protocolos de este tipo de redes, así como el de las capas física (PHY) y de acceso al medio (MAC) que hace uso del estándar IEEE 802.11p.

Simuladores Híbridos

El último tipo de simulador a destacar incorpora el desarrollo de una interfaz (intérprete) que se encarga de traducir las instrucciones entre el simulador de red y el generador de tráfico (modelo de movilidad). De esta forma, se consigue una unión híbrida entre ambas partes.

La Figura 8 muestra el esquema de funcionamiento de este tipo de simuladores, mostrando la inclusión del mencionado intérprete y el sentido bidireccional de la información que fluye a través de él.

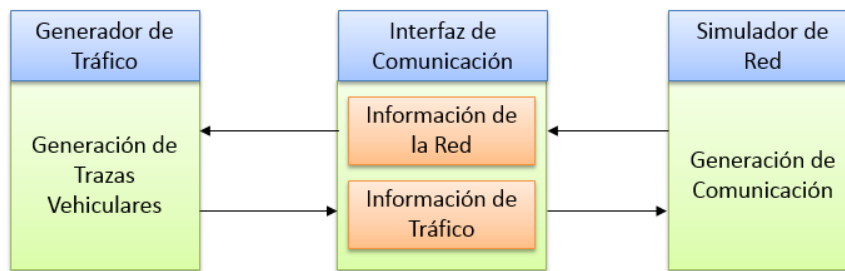


Figura 8. Simuladores Híbridos

La principal ventaja en el uso de este tipo de simuladores radica en el aprovechamiento que hacen de los beneficios que ofrecen ambas herramientas de simulación, sin embargo, encontramos la desventaja del alto coste computacional que conlleva al tener ambos simuladores trabajando de forma concurrente. También tenemos que tener en cuenta que la adicción de una interfaz de comunicación entre simuladores puede suponer un desarrollo complejo en función de los simuladores y la red de la que hagamos uso.

3.2.3. Herramientas de Simulación en Redes Vehiculares

Una vez vista la clasificación de simuladores y modelos de movilidad, la presente sección presenta las herramientas de simulación para redes vehiculares más conocidas atendiendo a la clasificación en tres categorías: Simuladores de Tráfico, Simuladores de Red y Simuladores de VANET.

3.2.3.1. Simuladores de Tráfico

SUMO

SUMO (*Simulation of Urban MOvility*) [79], es un simulador de tráfico gratuito que fue desarrollado por la DLR (*Dutsche Gesellschaft für Luft und Raumfahrt*) en lenguaje C++, que permite simular el tráfico microscópico y además el movimiento de los vehículos teniendo en cuenta variables como los peatones y el transporte público. Además, SUMO tiene en consideración los distintos carriles de las vías, por lo que también implementa los cambios de carril de los vehículos, así como el comportamiento de los mismos en los cruces.

Una de las principales ventajas que ofrece es su interfaz gráfica de usuario (GUI) que ayuda de forma considerable al desarrollo de escenarios, no teniendo límite de tamaño de la red ni de número de vehículos (más allá del límite computacional que pueda suponer). Otra ventaja que presenta es que puede funcionar en diferentes sistemas operativos. Por contra, una de las principales desventajas que presenta el uso de este simulador de tráfico es que calcula las rutas de los vehículos antes de comenzar la simulación, lo que dificulta la evaluación de la comunicación V2V ya que puede sufrir cambios durante su transcurso debido al movimiento de los vehículos a lo largo del escenario. Pese a ello, es uno de los simuladores de tráfico más utilizados en el ámbito de la simulación de redes vehiculares.

VanetMobiSim

VanetMobiSim [80] es una extensión del *framework* utilizado para la simulación de vehículos llamado CanuMobiSim (*CANU Mobility Simulation Environment*) [81]. Está implementado en Java como una aplicación independiente, permitiendo su utilización con casi cualquier herramienta de simulación dedicada a redes, por ejemplo, ns-2 o *Qualnet*. VanetMobiSim destaca por su versatilidad en el uso de modelos de movilidad tanto macroscópicos como microscópicos.

Cuando hablamos de nivel macroscópico, VanetMobiSim puede importar mapas de la base de datos de la oficina del censo de los Estados Unidos (en formato TIGER/Line) o generarlos aleatoriamente utilizando teselaciones de Voroni (creación de zonas partiendo de puntos concretos) permitiendo simular carreteras con varios carriles y considerando la señalización en intersecciones, flujos de tráfico en ambos sentidos y limitaciones de velocidad. Haciendo referencia al nivel microscópico, permite utilizar modelos de movilidad que utilizan interacciones V2V y V2I para regular, entre otros parámetros, la velocidad de los vehículos.

En este caso, el simulador requiere de la instalación de la versión 1.5 o superior de JRE (*Java Runtime Environment*), o, en el caso de la descarga de archivos fuente, la presencia en el equipo donde sea instalado de la versión 1.5 o superior de Java SDK y Apache Ant. También es importante mencionar que su funcionamiento se limita a máquinas JVM (*Java Virtual Machine*) de Sun, pues esta versión no es la que viene preinstalada en sistemas Windows y Linux.

STRAW

El simulador de tráfico gratuito STRAW (*Street RAndom Waypoint*) [82], fue desarrollado por AquaLab siendo capaz de simular el comportamiento real de los vehículos con un elevado grado de detalle gracias al uso de un modelo de movilidad basado en el estudio del tráfico en varias ciudades de Estados Unidos. Este simulador fue diseñado para que fuera usado junto con un simulador discreto de eventos (el simulador de red JiST/SWANS) no pudiendo utilizar en otro simulador las trazas que genera. Actualmente, se ha desistido en el desarrollo de nuevas funcionalidades para STRAW ya que la última versión se desarrolló para SWANS++ (versión mejorada de JiST/SWANS).

Además del uso de simuladores de red cuando se utiliza STRAW, es recomendable descargar el IDE Eclipse y el software TMRS, cuya función es la de convertir los mapas de TIGER (*Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing*) a un formato compatible con este simulador.

STRAW, formó parte del proyecto C3 (*Car-to-Car Cooperation*) de Aqualab, en el que se buscaba la implementación de protocolos que consiguieran un sistema cooperativo, de intercambio de información entre vehículos, que permitiera una amplia escalabilidad, adaptabilidad y tolerancia a fallos.

BonnMotion

Este software gratuito e implementado por la Universidad de Bonn en Alemania, en concreto por el grupo Toilers del Colegio de Minas de Colorado (USA) y el grupo de Sistemas Distribuidos de la Universidad de Osnabrück de Alemania, permite analizar escenarios de movilidad, siendo uno de los más extendidos para el estudio de redes MANET [83].

Una de las ventajas que tiene el uso de este simulador, es la interoperabilidad de los escenarios de tráfico creados con simuladores como ns-2, ns3 o MiXim siendo posible gracias a que BonnMotion guarda las rutas que trazan los nodos siguiendo el modelo nodo y enlace (*node and link*) dedicando una línea para cada uno de los nodos de la red implementada. Otra de las ventajas que presenta BonnMotion radica en que puede ser utilizado en cualquier plataforma que tenga JRE compatible con la versión de Java Oracle 1.8, permitiendo, de este modo, su uso tanto en OS X, Linux y Windows.

La principal desventaja que tiene para la simulación de redes VANET está ligada a la simplicidad en la representación de los movimientos de los nodos impidiendo una simulación que se aproxime a la realidad de forma aceptable. Esto se debe a que no tiene en consideración la movilidad de los nodos de forma totalmente aislada.

3.2.3.2. Simuladores de Red

OMNet++

El simulador de red OMNet++ [84], es una librería de simulación escrita en C++ cuyo propósito inicial era el desarrollo de simuladores para todo tipo de redes de comunicaciones (inalámbricas y cableadas) y otros tipos. Pese a ser un software propietario, OMNet++ tiene una licencia pública que puede ser utilizada únicamente con fines académicos, teniendo también una licencia de uso comercial de SimulCraft Inc.

OMNet++ se caracteriza por ser extensible, siendo capaz de dotar a cada tipo de red con funcionalidades específicas de esa red, añadiendo modelos que han sido desarrollados como proyectos independientes. De este modo, OMNet++ trabaja con módulos (o componentes) independientes que son programados en C++ y que se ensamblan posteriormente en módulos más grandes utilizando un lenguaje de alto nivel llamado NED (*NEtwork Description*).

Otra de las características de este simulador es su desarrollo integrado con Eclipse, teniendo un interfaz gráfico de simulación y una gran cantidad de herramientas que permiten ampliar su funcionalidad inicial como la simulación en tiempo real, el uso de bases de datos, etc.

En este caso, el simulador de red OMNet++ funciona en diversos entornos como Windows, Linux, Mac OS X y otros sistemas Unix, teniendo la consideración que para trabajar con su IDE únicamente se puede hacer uso de los tres primeros.

NS-2

Ns-2 [85] es un simulador de eventos discretos que, en la actualidad, se emplea principalmente en el ámbito académico y que se espera que sea sustituido por ns-3 en los próximos años.

Este simulador, escrito en C++, tiene una extensión TLC orientada a objetos (oTLC) la cual puede ser utilizada para la ejecución de scripts y la especificación de aspectos como la topología de la red evitando, en 1996, recompilaciones innecesarias cuando se modifican los parámetros de simulación. Sin embargo, en la actualidad, no existe este problema y esta solución implica empeorar el rendimiento de la simulación completa.

En este caso, ns-2 permite realizar simulaciones teniendo en cuenta diferentes parámetros como: la forma de propagación, los efectos de los rebotes de la señal y los protocolos del estándar IEEE 802.11, permitiendo obtener un alto grado de detalle en la simulación de las VANETs.

Una de las principales ventajas que presenta el uso de este simulador es que la salida proporcionada puede ser utilizada por otros programas como SUMO (simulador de tráfico explicado anteriormente) permitiendo una integración entre ambos.

NS-3

El simulador ns-3 [86] fue financiado por el NSF (*U.S. National Science Foundation*) con el fin de reemplazar al simulador ns-2, encontrándose también disponible públicamente bajo licencia GNU GPLv2 y teniendo lanzada su primera versión del software en junio de 2008 publicando sucesivas versiones.

Ns-3 fue diseñado en C++ permitiendo la integración de algunas características implementadas en lenguaje Python. De este modo, y a diferencia de ns-2, no se recurre al uso de oTLC, lo que implica que las trazas de código (o scripts) desarrollados para este simulador no pueden ser utilizados en el nuevo.

El simulador de red está compuesto por un conjunto de librerías combinables entre sí y con otras externas, incorporando una interfaz gráfica que permite el uso de diferentes herramientas externas. Por defecto, ns-3 trabaja en línea de comandos o utilizando herramientas de desarrollo de C++ y Python teniendo un proyecto dedicado a ello [87].

Pese a que ns-3 se utiliza sobre sistemas Linux, también puede utilizarse en FreeBSD y Cygwin, teniendo la posibilidad de hacerlo compatible con Windows Visual Studio.

JiST/SWANS

JiST (*Java in Simulation Time*) [88], es un simulador de eventos discretos que funciona sobre una máquina virtual de Java utilizando la denominada simulación virtual con la que se consigue optimizar el consumo de tiempo y el consumo de memoria que gasta en la simulación.

Las simulaciones mediante el uso de JiST se escriben en Java (como su propio nombre indica) y se compilan con un compilador de Java corriente pudiendo ejecutarse sobre una máquina virtual sin necesidad de realizar ninguna modificación previa en ella.

Por su parte, SWANS es un simulador de redes que se utiliza sobre JiST creado para cubrir las necesidades de la investigación en este campo que otros simuladores no eran capaces de cubrir.

La funcionalidad de este simulador es similar a la de otros como ns-2, teniendo la capacidad de simular redes de mayor tamaño reduciendo, mediante el uso de JiST, las prestaciones de memoria y ejecución de aplicaciones de red estándar escritas en lenguaje Java.

A pesar de que JiST/SWANS ofrecía una buena plataforma para la simulación de redes inalámbricas, sus desarrolladores han desistido en la ampliación de sus características, motivo por el cual se justifica la aparición de SWANS++ (simulador de código abierto que busca continuar ampliando la funcionalidad de JiST/SWANS).

3.2.3.3. Simuladores de VANET

Veins

Veins (*Vehicles in Network Simulation*) [89] es un simulador híbrido de código abierto enfocado en la simulación de redes VANET. Para su correcto funcionamiento se debe valer de un simulador de movilidad (o generador de tráfico) y un simulador de red, teniendo en OMNeT++ y SUMO sus mejores aliados.

El simulador Veins ofrece un conjunto de modelos para simular diferentes comunicaciones de tipo V2V consiguiendo la integración de los simuladores expuestos anteriormente (ver Figura 9).

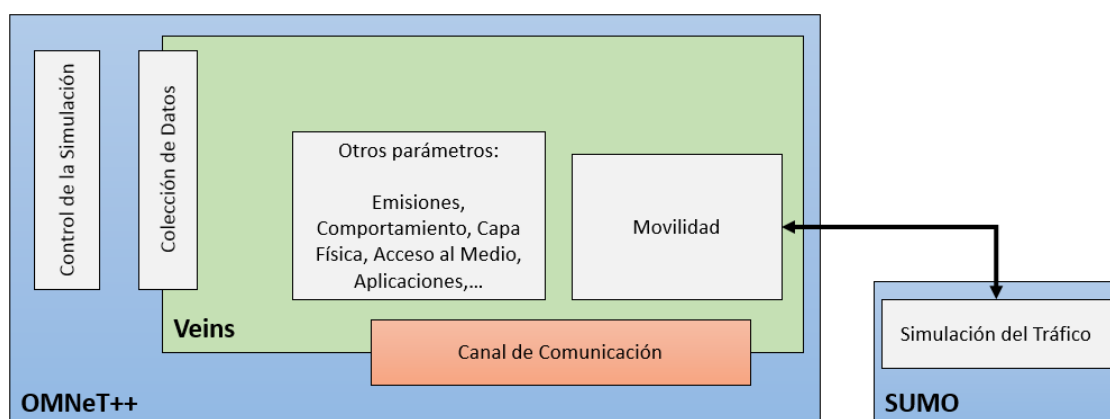


Figura 9. Integración Básica de los Simuladores

En este caso, el movimiento de los vehículos (generado por SUMO) se refleja en el movimiento de los nodos del simulador de red (OMNet++). De esta forma, los nodos pueden interactuar con el tráfico de la carretera de forma simple y precisa pudiendo desarrollar, analizar y evaluar aplicaciones destinadas a los ITS mediante el uso de redes vehiculares.

Entre las principales características de este simulador encontramos la utilización de modelos detallados de las capas IEEE 802.11p e IEEE 1609.4 DSRC/WAVE, la utilización de mapas de OpenStreetMap con alto nivel de detalle (velocidades, semáforos, cruces, etc.) y el uso de modelos computacionales para considerar zonas conflictivas por la presencia de edificios u otros vehículos.

PARAMICS

PARAMICS [90], propiedad de Quadstone Limited, es un simulador integrado que funciona sobre sistemas operativos Windows englobando una serie de herramientas que permiten la realización de análisis y el diseño de redes de vehículos. Es capaz de simular individualmente el comportamiento de los diferentes componentes del tráfico y presentar el resultado de forma gráfica (en 2D o 3D) en tiempo real. Además de esto, el simulador es capaz de modelar de forma detallada el trazado físico de los nodos teniendo en cuenta el transporte público, los nodos especiales, por ejemplo, vehículos de emergencia, el comportamiento de los conductores y elementos de señalización de la vía.

La característica de poder representar el comportamiento del escenario en tiempo real permite observar inmediatamente las repercusiones en el tráfico y la congestión del mismo tras realizar modificaciones en el escenario, teniendo un formato de archivos abierto que lo hace compatible con otros simuladores.

TraNS

TraNS (*Traffic and Network Simulation Environment*) [91] es un simulador híbrido escrito en C++ y Java que funciona en Windows y Linux y que contiene una herramienta de visualización que permite integrar los simuladores SUMO y ns-2 con el fin de obtener la simulación de redes VANET.

Entre las principales funcionalidades de TraNS encontramos: el uso de TraCI (*Traffic Control Interface*) [92] que permite a los simuladores trabajar conjuntamente, la simulación de eventos como por ejemplo, accidentes, la generación de posibles rutas aleatorias de vehículos y el uso de mapas de tipo TIGER y Shapefile que generan las trazas de movilidad utilizadas por ns-2 gracias al uso del simulador de tráfico SUMO. Además de las funcionalidades mencionadas anteriormente, cuenta con dos aplicaciones destinadas a redes VANET llamadas *Road Danger Warning* y *Dynamic Reroute*.

A pesar de la buena integración entre simuladores y la capacidad de simulación de redes VANET, el desarrollo de TraNS se ha suspendido tras la publicación de su versión TraNS v1.2, la cual ya no es compatible con SUMO, con el fin de impulsar el uso de

TraNSLite, siendo esta última una versión del mismo simplificada y que no utiliza ns-2 para realizar las simulaciones, sino que busca generar él mismo un modelo de movilidad reduciendo considerablemente el número de funcionalidades que posee. La principal ventaja de esta nueva versión es su rápida instalación ya que puede estar en funcionamiento en unos pocos minutos disponiendo de Java en el equipo.

NCTUns

El simulador integrado NCTUns (*National Chiao Tung University Network Simulator*) [93] es gratuito siendo capaz de simular protocolos de todo tipo de redes, tanto cableadas como inalámbricas. Entre las características principales de este simulador/emulador destaca el hecho de utilizar la pila de protocolos TCP/IP de Linux para obtener resultados de simulación precisos teniendo en cuenta las simulaciones de redes VANET simulando el protocolo 802.11p/1609 WAVE para establecer comunicaciones de tipo V2V y V2I. Además, NCTUns soporta la simulación concurrente y remota incluyendo una GUI que facilita al usuario poder establecer la topología de las redes, configurar los módulos de protocolo en cada nodo y representar los resultados de forma gráfica.

Uno de sus principales inconvenientes radica en que su uso está disponible únicamente para sistemas operativos Linux.

3.2.4. Comparativa de Simuladores

Una vez estudiadas algunas de las herramientas de simulación más importantes para su aplicación a redes VANET, la presente subsección presenta una breve comparativa entre ellas.

Teniendo en cuenta el análisis comparativo de los simuladores de tráfico desarrollados en la sección anterior, podemos observar en la Tabla 3, que el simulador que menos prestaciones nos ofrece a la hora de realizar la simulación de escenarios realistas es *BonnMotion*. Esto se debe a que, inicialmente fue un simulador de redes de tipo MANET, por tanto, su diseño no se adecúa en su totalidad a las necesidades de simulación de las redes VANET.

Respecto a la precisión de los otros tres simuladores en función de las características de simulación requeridas encontramos en SUMO la mejor solución, ya que es una herramienta que nos permite obtener un mayor grado de detalle a la hora de simular redes VANET a pesar de que realice el cálculo de las rutas antes de iniciar la propia simulación.

Realizando la comparativa de los simuladores de red, destaca la aparición de OMNet++ teniendo la principal ventaja en su estructura modular, aportando gran extensibilidad a los proyectos que se desarrollan sobre él y atendiendo a la movilidad de las redes VANET de forma adecuada. También resulta interesante que, a diferencia de otros simuladores como ns-2, su código sigue en continuo desarrollo con nuevas versiones en la actualidad.

	SUMO	VanetMobiSim	STRAW	BonnMotion
Características del Simulador				
Gratuito	SI	SI	SI	SI
Lenguaje	C++	Java	-	Java
Plataforma	Windows, Linux	Cualquiera con JRE 1.5 o superior	SWANS++	Cualquiera con Java 1.8 o mayor
Simuladores Compatibles	Ns-2, GloMoSim, Qualnet	Ns-2, GloMoSim, Qualnet	Ns-2, GloMoSim, Qualnet	Ns-2, ns-3 GloMoSim, Qualnet
GUI	SI	SI	NO	SI
Uso de mapas reales	SI	SI	SI	SI
Características de la simulación				
Carreteras con varios carriles	SI	SI	SI	NO
Sentido del Tráfico	SI	SI	SI	NO
Movimiento Peatones	SI	NO	NO	NO
Tipos de Vehículo	SI	NO	NO	NO
Gestión de Intersecciones	SI	SI	-	NO
Señalización	SI	SI	SI	NO

Tabla 3. Comparativa de Simuladores de Tráfico

Aunque ns-3 y SWANS++ ofrecen unas prestaciones aceptables a la hora de simular, tienen diversos inconvenientes. Ns-3 no ha conseguido la compatibilidad plena con las extensiones desarrolladas en ns-2, mientras que SWANS++ tiene la gran desventaja de no permitir la interacción entre el modelo de red y el simulador de red, reduciendo las capacidades de creación de una red vehicular próxima a la realidad. En este caso OMNet++, por el contrario, dispone de un conjunto amplio de modelos desarrollados para ampliar sus funcionalidades además de una interfaz gráfica potente y el uso del lenguaje NED, que nos permite definir parámetros variables durante el proceso de simulación.

Por último, y en referencia a los simuladores de VANET, el criterio utilizado para evaluarlos ha sido su mayor uso, independientemente de la licencia de cada simulador y de su tipo (integrado o híbrido). Encontrando PARAMICS (con licencia privada), uno de los simuladores más utilizados para el estudio del tráfico en Reino Unido.

El resto de simuladores de VANET, todos ellos de licencia gratuita, tienen la ventaja de contar con la implementación del estándar IEEE 802.11p. Sin embargo, la nueva versión de TraNS, TraNSLite, no es capaz de ofrecer todas sus funcionalidades las cuales no son compatibles con las nuevas versiones de SUMO para estudiar en profundidad este tipo de redes.

De igual forma que TraNS, Veins cuenta con el beneficio de haber sido diseñado para simular específicamente redes VANET, pero aprovechando la cooperación con simuladores como SUMO y OMNet++. Sin embargo, el hecho de que no sea un simulador integrado (sino híbrido) hace que el coste computacional que requiere sea mayor, pues se necesita que los dos simuladores se estén ejecutando a la vez y, además, sea necesaria la configuración de ambos.

3.3 Caso de Estudio: Aplicación de Simulación para el Intercambio de Vídeo bajo el Estándar H.265 (HEVC) Usando Redes Vehiculares 802.11p

Como hemos visto a lo largo de la explicación realizada en la sección 3.2, la simulación de las redes vehiculares es un mecanismo fundamental para el despliegue, análisis y evaluación de nuevas aplicaciones y servicios ofrecidos desde el punto de vista de las redes VANET aplicadas a los ITS. Por todo ello, esta sección presenta un caso de estudio aplicado, realizando la integración de 3 simuladores: SUMO, OMNet++ y Veins, para la evaluación de la transmisión de vídeo codificado bajo H.265/HEVC sobre redes vehiculares que siguen el estándar IEEE 802.11p. Los resultados del estudio propuesto revelan la viabilidad del uso de la simulación para este tipo de redes y una aproximación inicial a la transmisión de elementos multimedia en entornos de comunicaciones entre vehículos.

3.3.1. Introducción

Al encontrarnos actualmente ante la imposibilidad de equipar a un gran número de vehículos con interfaces de comunicación y equipos dedicados a las redes vehiculares 802.11p, debemos hacer uso de la simulación para poder corroborar que las hipótesis iniciales en el desempeño de servicios y tareas para ITS son válidas. En este sentido, son muchos los artículos, libros, estudios y proyectos que enfocan sus esfuerzos en la simulación de redes de vehículos realistas para poder abordar temas relacionados con la interconexión vehicular. Por ejemplo, el estudio conducido por C. Cicconetti et al. [94], estableció una relación entre las medidas teóricas desarrolladas y las medidas reales de un banco de pruebas para el estándar 802.11p. Según los autores, estos experimentos conducen a una aproximación adecuada entre los datos disponibles a partir de mediciones reales, usando tarjetas *NEC Linkbird-MX* que implementan el estándar IEEE 802.11p, demostrando que los resultados obtenidos están muy relacionados con la posibilidad de evaluar pruebas experimentales reales basadas en el mismo estándar sin la necesidad de realizar mediciones en la carretera. De este modo, corroboran que el uso de los entornos simulados para este tipo de pruebas es viable. Otros trabajos como [95] o [96], también centran la base de sus estudios, dedicados a las redes VANET, en la simulación obteniendo resultados bastante precisos y pudiendo evaluar el desempeño que efectúa una red vehicular 802.11p en el intercambio de diferentes tipos de datos [77].

Centrando más el eje de la contribución en investigaciones relacionadas con el intercambio de vídeo en redes vehiculares, podemos observar como en los últimos años es un tema de interés para la comunidad investigadores proliferando artículos donde se realiza un estudio de intercambio de vídeo bajo el estándar H.264/AVC en entornos vehiculares 802.11p [98] y que obtuvo unos resultados que fueron mejorados en un estudio posterior [99]. En los últimos años, la evaluación del intercambio de vídeo en redes vehiculares está teniendo un auge considerable. Prueba clara de ello es que se están llevando a cabo investigaciones donde se desarrollan transmisiones de vídeo en escenarios 802.11p, incluso en entornos reales [100] y protocolos de enrutamiento

dedicados a la transmisión de vídeo en tiempo real dentro de las redes VANET [101] o la creación sistemas de vídeo-vigilancia basados en comunicaciones V2I, demostrando la viabilidad de la propuesta en un radio aproximado de 600 metros [102].

Por todo lo expuesto anteriormente, la contribución de este caso de estudio se basa en el concepto de la aplicación de la simulación para el despliegue de redes vehiculares y la posibilidad de intercambio de datos (en este caso de vídeo) entre vehículos, ya que, en la actualidad, este tipo de sistemas de comunicaciones no se ha implantado de forma amplia en el tejido empresarial dedicado al mundo de la automoción.

3.3.2. Integración de los Simuladores y Puesta en Marcha

Una vez estudiados y seleccionados los simuladores que se iban a emplear, en nuestro caso SUMO como simulador de tráfico, OMNeT++ como simulador de red y Veins como simulador de VANET, debíamos proceder a poner en marcha el escenario completo de simulación haciendo referencia, no solo a los parámetros relacionados con la simulación en sí, sino también a la integración de los simuladores para que ofrezcan una completa red vehicular con mapas reales.

Viendo la Figura 10, podemos observar un diagrama de comunicación y entender cómo se realiza el intercambio de información en busca de la integración de los tres simuladores utilizados en el caso de estudio.

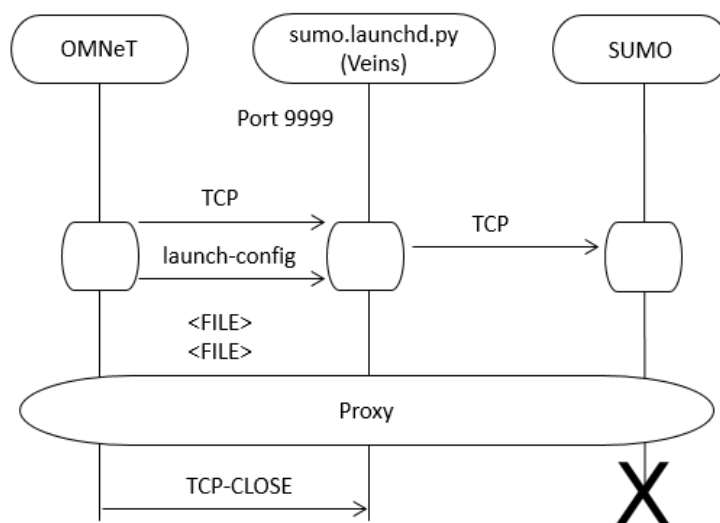


Figura 10. Diagrama de Comunicación para la Integración de los Simuladores Empleados

Como observamos, la comunicación entre OMNeT y SUMO se realiza vía TCP mediante un script desarrollado en Python y lanzado desde el terminal que contiene Veins y que se conecta también con el simulador de movilidad o tráfico (SUMO).

En este caso, la puesta en marcha la iniciamos con el simulador SUMO mediante la exportación del mapa sobre el que actuará la red. Para poder importar el mapa deseado

accedemos al entorno de *openstreetmap*⁷, desde donde exportaremos el plano con extensión, “.osm”. Para que el simulador de tráfico sea capaz de tratar con este tipo de mapas debemos modificar la extensión a .net.xml. Para ello, el propio simulador SUMO implementa un ejecutable, llamado *netconvert* que nos cambia la extensión consiguiendo toda la información necesaria para su representación. Para atender a la representación del modelo de movilidad, hicimos uso de la herramienta MOVE (*MObility model generator vor VEhicular Networks*) [103], que nos permitió crear patrones de movilidad de vehículos teniendo, entre otros parámetros, el tipo de mapa (aleatorio, manual o importado), el movimiento de los vehículos (automático o manual) teniendo en cuenta diferentes variables como el número de vehículos, los giros, flujos, etc., y los parámetros generales de la simulación para su correcta configuración y visualización. En nuestro caso, y como tratábamos de probar únicamente la viabilidad de la simulación en entornos de redes vehiculares, elegimos la importación de un mapa, teniendo definido el movimiento de los vehículos de forma manual, pero atendiendo a un número diferente de vehículos en cada evaluación.

Mediante el uso del framework de Veins, que se encuentra disponible en la carpeta importada en OMNet++ *mixim*, podemos usar los servicios del estándar IEEE 802.11p dentro de este tipo de comunicaciones interactuando directamente con el simulador SUMO a través del intercambio de mensajes explicado con anterioridad. Al existir la necesidad del uso de comunicaciones vehiculares mediante 802.11p, y sabiendo que este estándar modifica la capa física y de acceso al medio para atender a las características especiales de los entornos vehiculares, vemos en la Figura 11, el bloque Nic80211p que será el encargado del envío y recepción de datos que encontramos en el simulador.

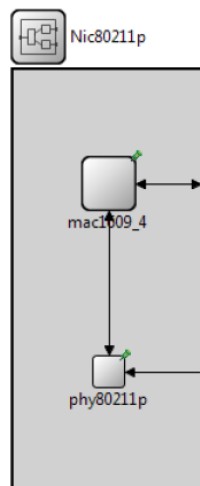


Figura 11. Módulo Nic802.11p.NED

Una vez integrados los simuladores e importado el proyecto Veins que nos permitirá simular la red vehicular completa dentro de un entorno 802.11p, estamos en disposición de poder realizar las evaluaciones del intercambio de vídeo dentro de esta red.

⁷ <http://www.openstreetmap.org/>

3.3.3. Evaluación del Intercambio de Vídeo H.265 en una Red IEEE 802.11p

Esta subsección presenta el proceso de evaluación de intercambio de vídeo dentro de la red vehicular. Especificamos tanto la descripción de los escenarios y pruebas realizadas, como la descripción del proceso de obtención de datos de vídeo para su posterior transmisión.

3.3.3.1. Escenario de Pruebas

Para la evaluación del intercambio de vídeo en redes 802.11p, se decidió tomar un mapa importado de la ciudad de Cehegín (Murcia), que atendía a un cruce de vías simple. En la Figura 12, podemos ver el mapa, representado sobre el simulador SUMO, con la indicación de ruta (color azul y rojo) seguida por los vehículos que la atravesaban.

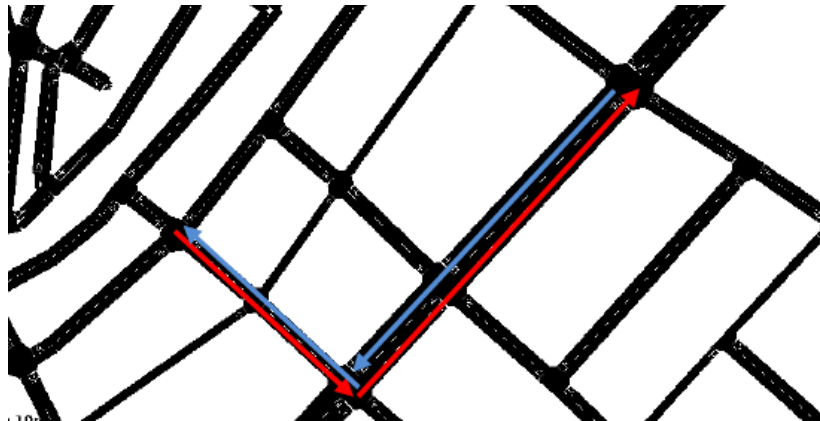


Figura 12. Representación de mapa real sobre simulador SUMO con indicación de ruta seguida por los vehículos

Al tener esta definición de mapa, obtenemos un cruce obligatorio de vehículos dentro de dos rutas estáticas definidas para ello. Se consideró no entorpecer la simulación con agentes externos ni variaciones de velocidad en el tránsito de los vehículos para comprobar si era efectiva la comunicación en el caso ideal de intercambio de datos de vídeo.

3.3.3.2. Obtención y Tratamiento de las Trazas de Vídeo

Para conseguir las trazas de vídeo empleadas en el estudio accedimos a la página web de la Universidad del Estado de Arizona, donde podemos extraer trazas de vídeo codificadas bajo diferentes estándares, y donde se encuentra disponible el del caso de estudio, el H.265/HEVC para la evaluación del rendimiento de redes de comunicaciones [104].

Una vez obtenidas las trazas de vídeo que se iban a emplear, se modificaron para obtener una traza adecuada para este tipo de redes ajustando los parámetros según vemos en la Tabla 4.

El conjunto de todos los *frames* que componen la trama final, dará lugar al tamaño de la traza completa que debemos transmitir. En nuestro caso, guardamos la trama en un fichero otorgándole el nombre de “*trazavideo*”. Una vez generada con los parámetros expuestos en la Tabla 4, los vehículos intercambiarán los *frames* de vídeo obteniendo dos ficheros para poder realizar la posterior evaluación y contrastar la pérdida de paquetes posterior. Estos ficheros de envío y recepción de trazas de vídeo se nombraron como “*trazasenvio*” y “*trazasrecibidas*”. De esta forma podemos tener un control total sobre los *frames* de vídeo que se pierden en la transmisión entre vehículos para poder evaluar las prestaciones de la red en función de ello.

Parámetro	Valor
Nombre de Traza	Stars Wars 4
Resolución	352 x 288
Frames por Segundo	30
Frames Totales	53968
Codificador	H.265/HEVC 8.0
Valor de Cuantificación	35

Tabla 4. Parámetros de traza de vídeo

3.3.3.3. Casos de Estudio

Esta subsección, presenta los 3 casos de estudio propuestos para la comprobación de la viabilidad del uso de herramientas de simulación para el despliegue de redes vehiculares en ciudad. En este caso, se ha propuesto el despliegue de una red vehicular variando el número de vehículos que circulan en ella.

La elección de los casos de estudio ha sido basada en la afluencia de vehículos media de la circulación en ciudad teniendo en cuenta diferentes franjas horarias. De esta forma hemos diseñado un caso ideal de cruce de 2 vehículos para evaluar la transmisión de vídeo en una intersección instantánea. Un segundo caso con un total de 10 vehículos para obtener una situación más próxima a la realidad con una vía sin mucha densidad de tráfico y un entorno más colapsado, con 20 vehículos, encontrándose en un espacio de dimensiones reducidas.

Comunicación V2V para 2 Vehículos

El propósito de la creación de este caso de estudio era el de realizar una comunicación vehicular punto a punto entre dos vehículos que se cruzan en una vía de doble sentido. De esta forma, se podría comprobar si el intercambio de este tipo de información se hace efectivo cuando el tiempo de exposición de ambos vehículos es relativamente corto.

En la Tabla 5 podemos observar un resumen de los principales parámetros adoptados en el presente caso de estudio.

Parámetro	Valor
Número de vehículos total	2
Número de vehículos por sentido de circulación	1
Velocidad de vehículos	30 Km/h
Modo de Envío/Recepción de Información	Full-duplex

Tabla 5. Parámetros utilizados en caso de estudio de comunicación V2V con 2 vehículos

En la Figura 13, observamos la simulación real dentro del simulador SUMO cuando los vehículos inician la marcha para su cruce.

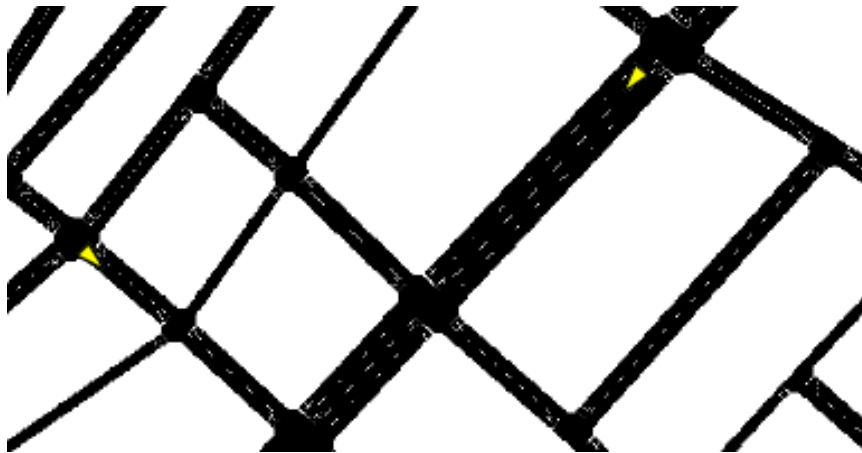


Figura 13. Inicio de simulación en SUMO con 2 vehículos

Comunicación V2V para 10 Vehículos

Este segundo caso pretende ofrecer una visión más próxima a la realidad sobre la afluencia de vehículos en un entorno urbano. Se decidió incorporar una cantidad de vehículos media para encontrar una densidad de tráfico sin excesiva cantidad de vehículos. La Tabla 6 muestra los parámetros relativos al presente caso de estudio.

Parámetro	Valor
Número de vehículos total	10
Número de vehículos por sentido de circulación	5
Velocidad de vehículos	30 Km/h
Modo de Envío/Recepción de Información	Full-duplex

Tabla 6. Parámetros utilizados en caso de estudio de comunicación V2V con 10 vehículos

De nuevo la Figura 14 muestra el inicio de la simulación real en SUMO utilizando en este caso un número de vehículos total de 10.

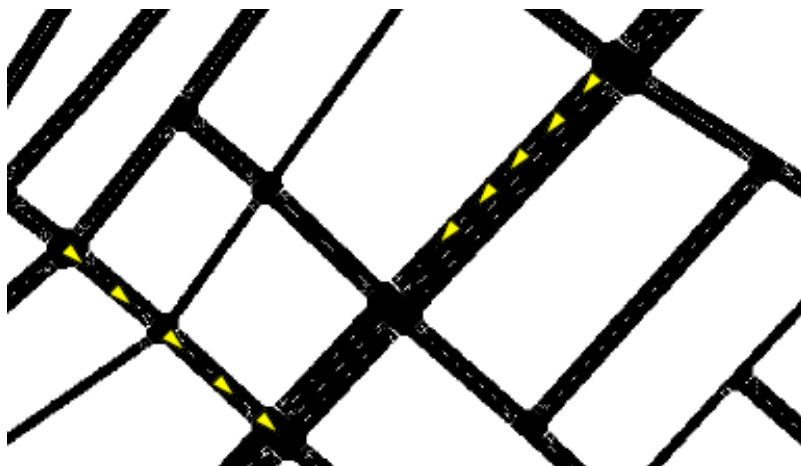


Figura 14. Inicio de simulación en SUMO con 10 vehículos

Comunicación V2V para 20 vehículos

Por último, se consideró como adecuada la opción de la inclusión de un número total de 20 vehículos atendiendo a un estado urbano congestionado para comprobar si en esta situación también se producía un intercambio de datos correcto. Al igual que en los anteriores casos de estudio, la Tabla 7, muestra los principales parámetros a considerar.

Parámetro	Valor
Número de vehículos total	20
Número de vehículos por sentido de circulación	10
Velocidad de vehículos	30 Km/h
Modo de Envío/Recepción de Información	Full-duplex

Tabla 7. Parámetros utilizados en caso de estudio de comunicación V2V con 20 vehículos

3.3.4. Análisis y Discusión de Resultados

Como hemos visto en la definición de los casos de estudios, todos son iguales, con la única diferencia del cambio en el número de vehículos que intervienen. La elección del parámetro de velocidad en 30 Km/h se efectuó en relación a la velocidad media de circulación por ciudad resultado otros estudios recientes [105]. Por otro lado, el envío y recepción de información por parte de los vehículos ha sido activado para que todos los nodos de la red puedan realizar ambas acciones.

En cuanto al análisis y discusión de resultados atenderemos a los 3 casos de estudio planteados en la subsección anterior (2.5.3) evaluando el *Packet Error Rate* (PER) en la transmisión de señal de vídeo y analizando las tramas enviadas y recibidas por cada uno de los vehículos involucrados en la comunicación.

3.3.4.1. Comunicación V2V para 2 Vehículos

En el primer caso de estudio, el cruce único de 2 vehículos, encontramos la situación más desfavorable debido al escaso tiempo de exposición de ambos en el rango de cobertura.

En la Figura 15 podemos observar el tiempo de ejecución (eje x) frente al porcentaje de paquetes perdidos (eje y). Parece evidente pensar que cada uno de los vehículos pierde un número muy grande de paquetes al inicio y final de la transmisión debido a que, en primer lugar, los coches se acercan y a continuación se alejan obteniendo una comunicación más eficiente cuando están más próximos (cuando el tiempo de ejecución es aproximadamente 6). Aun así, parece obvio que el porcentaje de paquetes perdidos es bastante alto, no pudiendo considerarse como aceptable este tipo de comunicación.

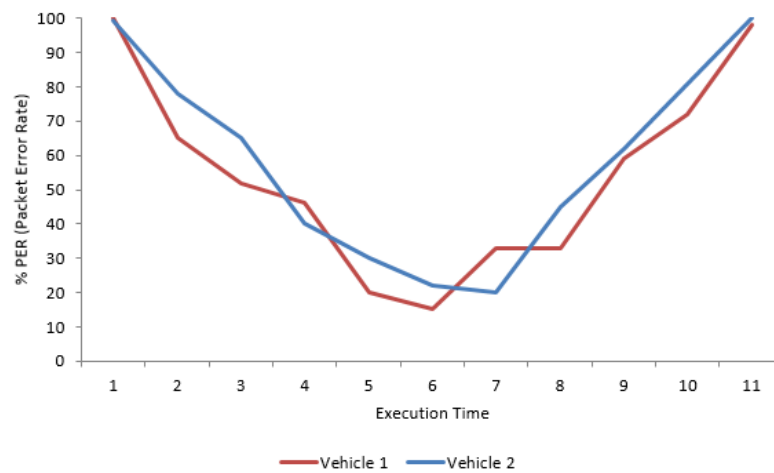


Figura 15. Tiempo de ejecución frente al porcentaje de paquetes perdidos en el caso de 2 vehículos

De la misma forma, cuando analizamos el número de paquetes perdidos en promedio (eje y) en relación a los vehículos que participan en el caso de estudio (eje x), la Figura 16 muestra valores muy elevados, obteniendo un 55% de paquetes perdidos en el caso del Vehículo 1 y aumentando este porcentaje hasta un 59% en el caso del Vehículo 2.

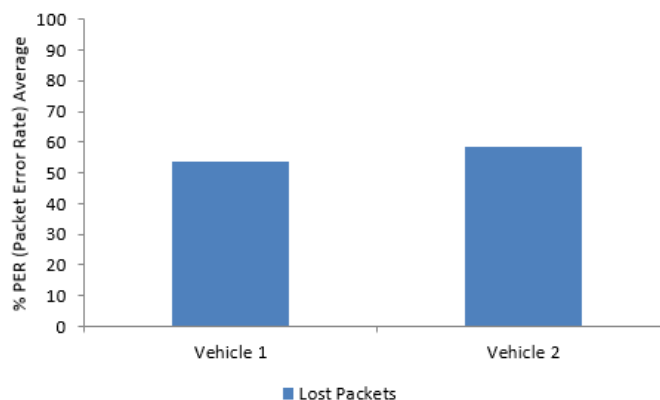


Figura 16. Vehículos frente al porcentaje de paquetes perdidos promedio en el caso de 2 vehículos

Estos resultados hacen inviable la posibilidad de la transmisión de vídeo en este tipo de comunicación al perder más de la mitad del contenido de los datos enviados por los vehículos.

Debemos recordar, que este escenario se basaba en la suposición de la idoneidad de la comunicación en un cruce simple de vehículos sin añadir ningún parámetro de comunicación externo dentro del entorno.

3.3.4.2. Comunicación V2V para 10 Vehículos

Cuando se procede a la simulación del caso de estudio en el que están involucrados 10 vehículos (5 en cada sentido) las prestaciones de la red vehicular, en cuanto al intercambio de información de vídeo, incrementan considerablemente. Esto se debe a que todos los nodos de la red son capaces de enviar y recibir información (intercambio *full-duplex*). Al tratarse de la misma traza de vídeo, si dos vehículos circulan en la misma dirección y a una distancia adecuada (dentro del rango de cobertura de los mismos) se producen un decremento acentuado de los paquetes perdidos.

La Figura 17, muestra como el porcentaje de paquetes perdidos (eje y) desciende con respecto al caso de estudio de cruce de 2 vehículos. De esta forma, los vehículos centrales (los que están expuestos constantemente a este intercambio de información) tienen una tasa de paquetes perdidos promedio de un 25% aproximadamente, reduciendo casi a la mitad la tasa de paquetes perdidos resultantes del primer caso de estudio.

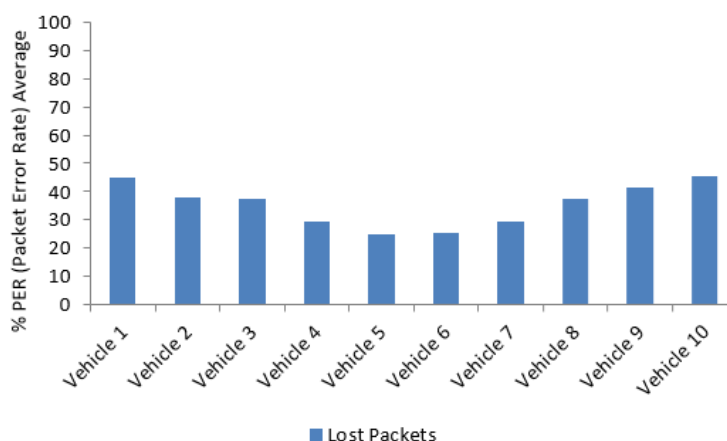


Figura 17. Vehículos frente al porcentaje de paquetes perdidos promedio en el caso de 10 vehículos

Atendiendo, al igual que para el primer caso de estudio, al tiempo de ejecución (eje x) y el porcentaje de paquetes perdidos (eje y) por vehículo, la Figura 18 muestra cómo el valor de este último eje va disminuyendo a lo largo de la ejecución, llegando a obtener valores de entre 2% y 10% para los casos de menor pérdida.

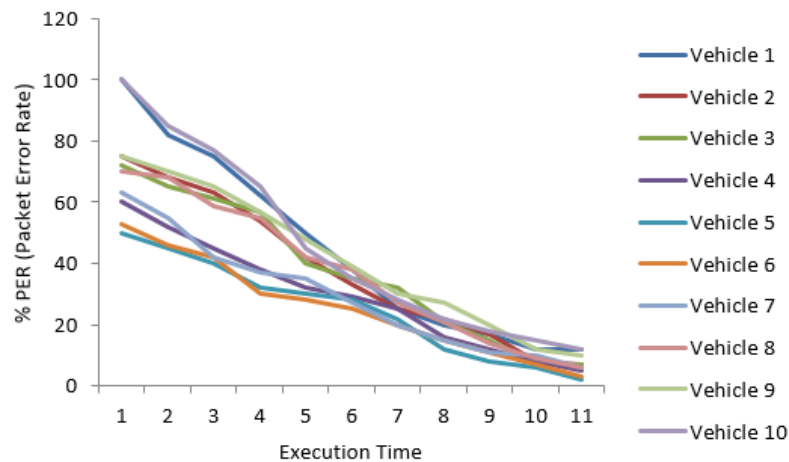


Figura 18. Tiempo de ejecución frente al porcentaje de paquetes perdidos en el caso de 10 vehículos

En esta ocasión, podemos deducir que el intercambio de vídeo, dadas las condiciones planteadas, se hizo efectivo, aunque teníamos algunas pérdidas puntuales de trazas de elementos de vídeo.

3.3.4.3. Comunicación V2V para 20 Vehículos

El último caso de estudio representa una congestión superior de la vía por la que circulaban los vehículos, con la finalidad de que los vehículos tuvieran una carga mayor de trabajo al tener que enviar/recibir datos de un número mayor de nodos.

Al igual que en los 2 casos de estudio anteriores, la Figura 19 muestra el porcentaje de paquetes perdidos en promedio (eje y) frente a cada uno de los vehículos a los que corresponde cada pérdida de información (eje x).

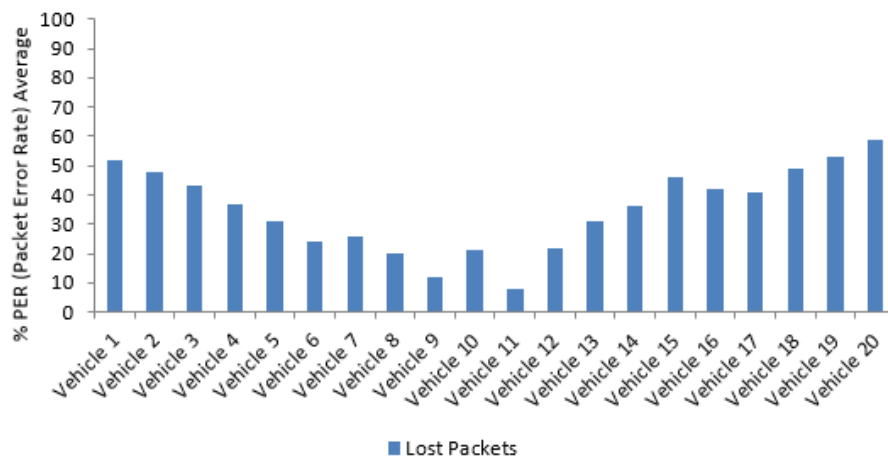


Figura 19. Vehículos frente al porcentaje de paquetes perdidos promedio en el caso de 20 vehículos

Podemos observar cómo, debido a la supuesta congestión del tráfico, el porcentaje de paquetes perdidos aumenta considerablemente en la mayoría de los vehículos al tener

que procesar más información (enviar y recibir trazas de vídeo) y existir un nivel de interferencia mayor en la comunicación.

Un dato a destacar es la baja tasa de paquetes perdidos que se producen en los vehículos centrales (Vehículos 9 y 11 respectivamente), debido a la ubicación central de los mismos dentro de la ejecución total de la simulación. Por simplicidad dentro de este caso de estudio, obviamos la gráfica referente al tiempo de ejecución frente al porcentaje de paquetes perdidos que haría casi imposible la distinción entre vehículos.

3.3.5. Conclusiones

En este caso de estudio, pudimos corroborar las prestaciones iniciales del intercambio de vídeo bajo el estándar H.265/HEVC haciendo uso de la integración de tres simuladores (SUMO, OMNeT++ y Veins).

Como principal conclusión encontramos que, la simulación es una herramienta clave para el diseño y evaluación de nuevas aplicaciones y servicios dedicados el mundo de los ITS. Estos nuevos desarrollos podrán aprovechar la potencialidad del uso de vehículos con capacidad de comunicación bajo estándares apropiados (como IEEE 802.11p), pudiendo proporcionar servicios que repercuten una mejora en la seguridad vial, una mejor gestión del tráfico y/o servicios dedicados a ofrecer información y entretenimiento (*infotainment*) a bordo de los vehículos.

Por otro lado, y a la vista de los resultados, parece obvio pensar que en un entorno en el que se cumplan las condiciones adecuadas para este tipo de comunicaciones, podemos obtener una tasa de éxito adecuada en la transmisión de vídeo. Una evidencia de lo expuesto es la aceptable cantidad de información enviada y recibida dentro del entorno vehicular, pudiendo realizar el despliegue de aplicaciones y servicios dedicados a este tipo de intercambio de información.

3.4 Contribuciones del Capítulo

El Capítulo 3 presenta el estándar IEEE 802.11p, dedicado a las redes vehiculares, así como la fundamentación básica de los entornos y herramientas de simulación de este tipo de redes.

La primera aportación del presente capítulo se basa en la revisión y estudio de las herramientas de simulación dedicadas a las redes vehiculares en la actualidad. Ante la imposibilidad del despliegue real de estas redes, que son capaces de incorporar nuevos servicios dentro de los ITS, se hace indispensable el uso de entornos simulados (a pesar de que los resultados obtenidos no son reales) que permitan llevar a cabo estudios, análisis y evaluaciones sobre posibles efectos favorables o desfavorables de la aplicación de esta nueva tecnología de intercambio de información dentro del mundo de los ITS.

Por otro lado, el creciente interés en el intercambio inter-vehicular de información suscita la decisión de la creación de diferentes casos de estudios que analicen, por un lado, la viabilidad del uso de las herramientas de simulación de redes vehiculares actuales y por otro, aproximen en una evaluación básica del intercambio de información multimedia, en nuestro caso, vídeo bajo el estándar H.265/HEVC. Los resultados obtenidos en ese sentido, vislumbran un amplio campo en la investigación y desarrollo de servicios e incluso aplicaciones que den lugar a un intercambio aceptable de información de diferentes tipos dentro de entornos urbanos e incluso interurbanos. Esta clase de aplicaciones también pueden ofrecer servicios básicos como; información en forma de notificaciones del estado de la vía en tiempo real, distribución de contenido multimedia para posibles detecciones de puntos de interés en la vía o con fines meramente comerciales.

Este capítulo, deja asentadas las bases del diseño y uso de las redes vehiculares dentro del entorno de los ITS mediante la realización de una profunda revisión de los entornos de simulación, así como la contribución de un caso de estudio práctico en el que se aplican las diferentes técnicas para el estudio de este tipo de comunicación.

A pesar de que la simulación es una herramienta fundamental en el estudio de redes vehiculares debido a la imposibilidad de llevar a cabo grandes experimentos en entornos reales, es evidente que los resultados simulados pueden diferir de los datos obtenidos de entornos reales. Por ello, se debe seguir la línea de intentar extrapolar las investigaciones y análisis obtenidos de simulaciones previas, a entornos reales para probar su viabilidad real y poder avanzar hacia una materialización real de la tecnología de comunicaciones.

Capítulo 4

4 Movilidad Inteligente en Redes Vehiculares

Como ya explicamos en el Capítulo 1, una de las principales líneas de investigación que surgió en el estudio de las Redes Vehiculares fue la Movilidad. La consecución de planes de movilidad adecuados dentro de un entorno urbano, e incluso interurbano, ya sea en el transporte de mercancías o transporte de viajeros, puede producir grandes beneficios a la sociedad mediante la reducción del periodo de exposición de los vehículos en carretera y, por tanto, la disminución del número de emisiones efectuadas por los mismos al medio ambiente.

Debido a los problemas de contaminación existentes en ciudades como Madrid, París o Roma, se han implantado medidas restrictivas que obligan a los usuarios, entre otras cosas, a limitar su velocidad de circulación, a respetar la prohibición del estacionamiento en zonas céntricas de la ciudad e incluso a acatar medidas de circulación en función del número de matrícula de su propio vehículo, atendiendo a la diferenciación entre números pares e impares. Todo este tipo de medidas provocan un cierto malestar entre la población que ven mermada su capacidad de libre circulación en ciudad.

Desde la hipótesis de que los niveles de contaminación pueden decrecer mediante la aplicación de planes de movilidad adecuados, y no mediante la aplicación de medidas, en muchos casos restrictivas, el presente capítulo realiza una descripción del concepto de Movilidad aplicado a las Redes Vehiculares. Para ello, realiza una revisión del estado actual de los sistemas de movilidad en ciudad, tanto en entornos simulados como reales y propone dos casos de estudio enfocados a la creación de planes de movilidad inteligente en ciudades.

Por un lado, se despliega un sistema colaborativo con el que se consigue reducir el tiempo de viaje de los automóviles evitando los atascos en ciudad y reduciendo de esta forma, las emisiones que los mismos hacen al medioambiente. En este caso, se emplea un sistema de lógica difusa para localizar cuando se produce un atasco y se usa el sistema colaborativo, basado en comunicaciones entre vehículos (V2V) y entre vehículos e infraestructura (V2I), para intercambiar información acerca del evento (ataasco) con el objetivo de una toma de decisiones adecuada en la selección de ruta.

Ante la problemática desarrollada en el capítulo anterior sobre el uso de la simulación para la obtención de resultados reales, en el presente capítulo también se desarrolla un completo caso de estudio sobre la inclusión de otras tecnologías comerciales y accesibles, como *Wi-Fi Direct*, de la que la mayoría de ciudadanos disponen, para implementar diferentes servicios y aplicaciones enfocados a los entornos vehiculares. Los resultados obtenidos son alentadores teniendo en mente la consecución de comunicaciones inter-vehiculares de forma real e intentando optimizar los resultados obtenidos desde los entornos simulados.

4.1 Sistemas Colaborativos y Movilidad Inteligente en Redes Vehiculares

Desde que se empezaron a estudiar las Redes Vehiculares, el concepto de la movilidad ha tenido una gran importancia al encontrarnos en un entorno en el que los nodos de la red se mueven amoldándose a unas características muy acentuadas: grandes cambios en la topología de red, recorrido de los nodos conocido (calles y carreteras) y velocidades de vehículos medias y altas. Teniendo en cuenta esto, la búsqueda de modelos que atiendan a la movilidad de los nodos de las redes vehiculares siempre ha sido caso de estudio.

Como se explicó en el Capítulo 3, en el campo de la simulación, existen simuladores que implementan modelos de movilidad basados en diferentes algoritmos o conceptos de movilidad terrestre, considerados como patrones de movimiento de los vehículos (nodos). Mediante una modificación adecuada de este tipo de modelo (muchas veces simulados a partir de datos tomados en ambientes reales) se pueden conseguir planes de movilidad inteligente que darán lugar a los beneficios mencionados anteriormente. Así mismo, la búsqueda de los modelos de movilidad que provean nuevos servicios para, por ejemplo, la selección de rutas dependiendo del estado del tráfico, ha sido objeto de estudio desde hace tiempo [106]. Hoy en día, estamos empezando a ver sus principales

efectos en los desarrollos tecnológicos actuales sobre vehículos, existiendo estudios orientados a la industria del automóvil que realizan análisis comparativos entre marcas para evaluar las estrategias actuales en el desarrollo de vehículos autónomos, vehículos conectados o entornos de movilidad inteligente [107].

En los últimos años, se ha demostrado que un enfoque colaborativo y coordinado al tratar de mejorar la eficiencia en los trayectos en entornos urbanos beneficia a todos los agentes involucrados. Esta afirmación ha sido demostrada por algunos estudios que demuestran que en un grupo de conductores que buscan el camino más corto a un destino, se alcanza un beneficio cuando se emplea un enfoque coordinado y no cuando un conductor decide cambiar su estrategia de viaje unilateralmente [108], o donde se demuestran los beneficios de usar sensorica y comunicaciones V2V en comparación con el simple uso de sensores [109]. Por lo que, una estrategia colaborativa puede suponer una mejor solución para obtener un plan de movilidad inteligente adecuado mediante el uso de las infraestructuras para navegar a través del tráfico urbano [110].

Dentro de los ITS, la conducción colaborativa ha ganado importancia en los últimos años debido al gran número de aplicaciones que hacen uso de este concepto, especialmente de aquellas que se refieren a la seguridad y eficiencia en la conducción. En ese sentido, algunos trabajos efectúan diversos análisis para evaluar el impacto de diversas medidas de densidad del tráfico y emisiones contaminantes de los vehículos, por ejemplo, el estudio llevado a cabo por Kitwiroon et al. [111], en el que se analizan estos valores para la ciudad de Londres, en el que los autores usan un sistema llamado OSCAR y aplican varias técnicas tales como reducir el número de vehículos pesados (HDVs) o los efectos de la velocidad, como en el caso de estudio que presentamos en este capítulo.

Por otro lado, los autores del estudio logran mejoras de hasta un 11% en términos de contaminación ambiental, reduciendo la tasa de HDVs en un 20% y determinando que la velocidad es un factor relevante cuando nos referimos a las emisiones de gases contaminantes por parte de los vehículos. El impacto de los límites de velocidad en el medioambiente depende directamente del impacto de estos valores en el comportamiento de los conductores. Otros estudios, evalúan el impacto de las reducciones de velocidad en las emisiones, utilizando diferentes enfoques de modelado (microscópico como macroscópico) [112]. En este caso, los investigadores encontraron que los límites de velocidad en zonas urbanas tienen un impacto no significativo en las emisiones de CO₂ y NO_x, siendo significativo para el caso de las partículas en suspensión (PM), mientras atienden a una simulación microscópica, teniendo en cuenta un ligero aumento cuando se llevan a cabo simulaciones macroscópicas.

Otras obras estudian la reducción de las emisiones en las intersecciones urbanas mediante el uso de contramedidas ITS [113]. Consideran en esta ocasión, restricciones en velocidad y la disminución del número de HDVs. En análisis muestra que, en un área específica, las emisiones de CO₂ generadas por los vehículos pueden reducirse hasta un 23%, siendo necesario reducir el tráfico de vehículos en un 20%. A diferencia de este tipo de estudios, nuestro caso propone una perspectiva para la reducción de las

emisiones de los vehículos sin limitar las condiciones del tráfico, consiguiendo reducir las emisiones de CO₂ hasta en un 12,27%.

Como ya se ha explicado anteriormente, muchos sistemas de conducción colaborativos, como el descrito en este caso de estudio para la detección de atascos en tiempo real y la selección de rutas alternativas, y otros que se usan con el objetivo de solucionar problemas inherentes al transporte por carretera como por ejemplo, las congestiones del tráfico [114]. Debido al hecho del carácter complejo de estos problemas (cambian con el tiempo dependiendo de varios factores), no es fácil tomar decisiones para su resolución ya que se maneja una información en muchas ocasiones inexacta. Para hacer frente a la incertidumbre generada por esta situación, la lógica difusa puede considerarse una herramienta útil [115]. En consecuencia, este tipo de enfoque nos permitirá modelar la problemática existente de forma más precisa y eficiente. En nuestro caso, detectar si hay o no un atasco de tráfico no dependerá de una combinación de decisiones binarias, sino que será preferible determinar la variable resultado mediante un sistema de inferencia de lógica difusa apropiado. En este caso, la lógica difusa nos permite obtener un grado de pertenencia a ciertas funciones definidas sobre el nivel de tráfico que nos permitirá determinar si se está produciendo un atasco o no en función de los niveles de tráfico actuales.

Realizando una búsqueda de trabajos previos sobre el uso de lógica difusa en redes VANET, podemos observar artículos en los que se utiliza un sistema basado en reglas difusas con el objetivo de modelar y predecir el flujo de tráfico [116] o estudios donde se propone un enfoque inteligente (adaptativo) del envío de mensajes de tipo “*beacon*” (“*Adaptive Beaconing Rate*” (ABR)) basado en lógica difusa que tiene en cuenta las características del tráfico para controlar la frecuencia del envío de mensajes de tipo “*beacon*”, tienen una alta aplicación dentro de los entornos VANET [117].

Como podemos observar, la aplicación de un enfoque basado en lógica difusa puede ser apropiado para la detección de eventos dinámicos en entornos de redes VANET, por ello, en la siguiente sección se propone un completo caso de estudio sobre movilidad inteligente haciendo uso de un sistema de inferencia de lógica difusa junto con comunicaciones vehiculares con el objetivo de evitar, en tiempo real, posibles atascos en la ciudad.

4.2 Caso de Estudio sobre Movilidad Inteligente: Integración de un sistema para el control del tráfico aplicando lógica difusa y comunicaciones vehiculares

Hoy en día, el incesante incremento de vehículos en carretera está provocando el aumento de las congestiones del tráfico y, consecuentemente, las poluciones que los mismos emiten al medio ambiente. Este tipo de problema es especialmente severo en entornos urbanos debido a la convivencia entre humanos y vehículos, y a la aglomeración de automóviles. Un punto crucial para determinar e intentar paliar este tipo de problema, se basa en la creación o diseño de planes de movilidad adecuados con

el objetivo de mejorar el flujo de tráfico y, como consecuencia, reducir el impacto negativo que producen los atascos.

Con el objetivo planteado anteriormente, el presente caso de estudio propone un plan de movilidad inteligente en ciudad que sigue una estrategia colaborativa entre vehículos. En este caso, cada vehículo trata de inferir el estado del tráfico usando su propia situación y la información que comparten otros vehículos de la red VANET formada. Usando un enfoque de lógica difusa, los vehículos realizan decisiones de acuerdo con los niveles de tráfico en tiempo real. El plan de movilidad diseñado fue probado en un entorno de simulación (ante la imposibilidad de la implantación a gran escala en ciudad). El sistema tiene en cuenta 2 tipos de escenarios urbanos, uno céntrico y otro periférico de la ciudad de Gijón (Asturias - España). El sistema incrementa la velocidad media de los vehículos hasta un 11,20% y reduce las emisiones de los vehículos en hasta un 12,27% en el mejor de los casos. A la vista de los resultados, vemos como el plan de movilidad inteligente ha ayudado a mejorar la circulación de los vehículos que son capaces de resolver problemas causados por la congestión o atascos del tráfico en tiempo real pudiendo seleccionar rutas alternativas que les permitan llegar a su destino en una menor cantidad de tiempo y, en consecuencia, con una menor cantidad de emisiones contaminantes.

4.2.1. Diseño del Sistema Colaborativo para la Movilidad Inteligente

El sistema colaborativo dedicado a la movilidad inteligente en entornos de ciudades, infiere en el tráfico a través de un enfoque basado en lógica difusa que es capaz de informar sobre 4 niveles de circulación: Tráfico muy bajo, Tráfico Bajo, Tráfico Medio y Tráfico Alto. Este enfoque nos permite determinar, mediante la definición de unas funciones de pertenencia y en función de unos parámetros de entrada, el nivel del tráfico en la actualidad. Estos valores permiten a los vehículos tomar decisiones y poder ajustar su comportamiento.

4.2.1.1. Descripción de las Comunicaciones

Para las comunicaciones se han usado dos tipos de mensajes: Mensajes de Alerta y Mensajes de Tráfico que siguen el formato WSM (*Wave Short Message*). Estos mensajes, enviados a través del protocolo WSMP, transmitidos a través del canal de control (CCH), encargado de distribuir los paquetes críticos dentro de la red. La información relativa al formato WSM, así como al protocolo WSMP y los canales empleados por el estándar IEEE 802.11p, están explicados en el Capítulo 3, concretamente en la sección 3.1.4.

4.2.1.2. Configuración del Sistema de Inferencia de Lógica Difusa

Un sistema de inferencia de lógica difusa, basado en Mamdani [118], está compuesto por 3 grandes bloques: el Difusor (*Fuzzifier*), el Motor de Inferencia (*Inference Engine*) y el Desdifusor (*Defuzzifier*), que podemos observar en la Figura 20.

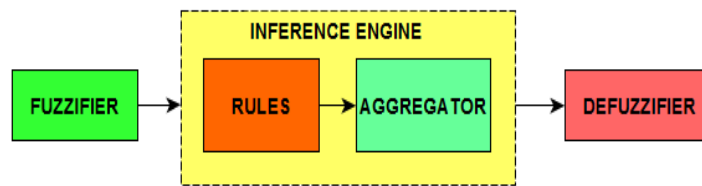


Figura 20. Sistema de inferencia de lógica difusa con el motor de inferencia incluido (reglas y el agregador)

El primer bloque es el encargado de asignar a cada variable de entrada un grado de pertenencia para un conjunto previamente definido. A continuación, su salida pasa por el siguiente bloque (motor de inferencia) que está formado por un conjunto de reglas y el bloque de agregación.

El bloque de reglas contiene un conjunto de normas lingüísticas (fuzzy rules o reglas difusas) que son del tipo IF-THEN. Tras evaluar los valores que se incorporan a ese bloque de inferencia con cada una de las reglas definidas, mediante la agregación difusa se obtiene el grado de pertenencia o adhesión a los conjuntos difusos de salidas establecidos. Por último, la salida del motor de inferencia va directamente al último bloque (desdifusor) que nos permite extraer un valor numérico concreto de la variable de salida, es decir, el resultado. En las Figuras 21, 22 y 23 se presentan las funciones de pertenencia a los conjuntos definidas para las variables de entrada de Velocidad y Tiempo y para la de salida de Nivel de Tráfico.

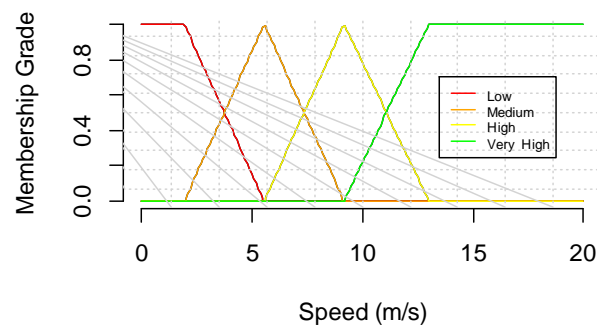


Figura 21. Función de Pertenencia - Velocidad

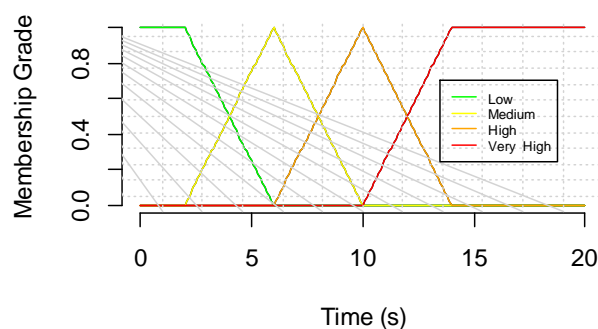


Figura 22. Función de Pertenencia - Tiempo

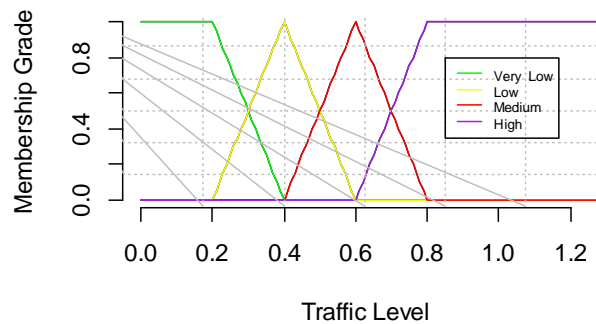


Figura 23. Función de Pertenencia - Nivel de Tráfico

Para aplicar este sistema a la detección de atascos, consideramos la velocidad a la que circula el vehículo y el tiempo de espera (tiempo en el que el vehículo no está en movimiento) como posibles variables. Teniendo en cuenta estos parámetros, se extraen ocho conjuntos difusos, que son: *Velocidad Baja*, *Velocidad Media*, *Velocidad Alta*, *Velocidad Muy Alta*, *Tiempo de Espera Bajo*, *Tiempo de Espera Medio*, *Tiempo de Espera Alto* y *Tiempo de Espera Muy Alto*, a los que pertenecerán los valores que los vehículos van adquiriendo a lo largo de la simulación. De este modo, el difusor de cada vehículo asignará a la variable de entrada correspondiente a un grado de pertenencia a uno de los conjuntos difusos definidos anteriormente para que los valores resultantes se puedan evaluar en el motor de inferencia dentro del bloque de las reglas. Como podemos observar en la Tabla 8, donde se definen las normas, tenemos para cada una de ellas el grado de pertenencia a dos conjuntos difusos determinados de modo que, para evaluarlos, se aplica el operador máximo o mínimo en función de la unión o la intersección de ambos siguiendo las fórmulas siguientes en cada uno de los casos (ecuaciones (1) y (2)):

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (1)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2)$$

Después de que la entrada del Difusor haya pasado por el bloque de reglas, se procede a realizar la agregación lógica. Esta operación es la encargada de obtener el grado de pertenencia de los conjuntos difusos de salida, referentes al tráfico: *Tráfico Muy Bajo*, *Tráfico Bajo*, *Tráfico Medio* y *Tráfico Alto*.

N° de Regla	Velocidad	Tiempo Espera	Tráfico
1	BAJA	BAJO	MEDIO
2	BAJA	MEDIO	MEDIO
3	BAJA	ALTO	ALTO
4	BAJA	MUY ALTO	ALTO
5	MEDIA	BAJO	BAJO
6	MEDIA	MEDIO	MEDIO
7	MEDIA	ALTO	ALTO
8	MEDIA	MUY ALTO	ALTO
9	ALTA	BAJO	MUY BAJO
10	ALTA	MEDIO	MUY BAJO
11	ALTA	ALTO	MEDIO
12	ALTA	MUY ALTO	MEDIO
13	MUY ALTA	BAJO	MUY BAJO
14	MUY ALTA	MEDIO	MUY BAJO
15	MUY ALTA	ALTO	BAJO
16	MUY ALTA	MUY ALTO	MEDIO

Tabla 8. Conjunto de Reglas para el sistema de lógica difusa empleado

Para cada uno de los conjuntos difusos de salida (tráfico) y de acuerdo con las reglas anteriores, se realiza el cuadrado de la suma de reglas asociadas a cada uno de ellos siguiendo las ecuaciones (3), (4), (5) y (6) en cada caso.

$$MUY\ BAJO = \sqrt{r_9^2 + r_{10}^2 + r_{13}^2 + r_{14}^2} \quad (3)$$

$$BAJO = \sqrt{r_5^2 + r_{15}^2} \quad (4)$$

$$MEDIO = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + r_6^2 + r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{16}^2} \quad (5)$$

$$ALTO = \sqrt{r_3^2 + r_4^2 + r_7^2 + r_8^2} \quad (6)$$

Una vez calculados, los valores resultantes pasan por el último bloque, el desfusor, en el que se realiza el cálculo del centro de gravedad para obtener un valor de salida escalar presentado en la ecuación (7).

$$output = \frac{\sum_{k=1}^N center_i \cdot strength_i}{\sum_{k=1}^N strength_i} \quad (7)$$

Como vemos sobre la ecuación (7), “strength” pertenece al grado de pertenencia de cada conjunto de salida, siendo “center” el valor central que se ha asociado a cada

conjunto difuso de salida. Puesto que uno de los principales objetivos del sistema planteado es la detección temprana de atascos (anticipación a la ocurrencia de grandes atascos), la asignación de los valores centrales (entre 0 y 1) de cada uno de los conjuntos no se realiza por igual, otorgando mayor peso a la salida que produce un mayor nivel de tráfico definiéndose los valores de 0,1 para el caso del tráfico muy bajo, un valor de 0,2 para el caso del tráfico bajo, 0,5 para el tráfico medio y 0,9 para el tráfico alto.

Una vez conseguido el valor de salida, y en función de unas fronteras de decisión establecidas, el vehículo será capaz de tomar las medidas necesarias en función del nivel de tráfico detectado en la vía.

4.2.2. Entorno de Simulación

Como vimos en el Capítulo 3 (sección 3.2), el uso de la simulación se plantea como la alternativa adecuada para el diseño y despliegue inicial de aplicaciones o servicios dentro de las redes vehiculares. Con el propósito de llevar a cabo el despliegue del sistema colaborativo diseñado, se usó un entorno simulado que hacía uso de Veins en su versión 4.4, un simulador de VANET híbrido que hace uso del simulador OMNet++ 5.0 (versión más reciente en la actualidad) y SUMO en su versión 0.25.0 como simulador de tráfico para llevar a cabo las experimentaciones.

Para realizar las pruebas, se atendió a una serie de características y parámetros tanto del entorno de simulación como de red que son resumidas en las Tablas 9 y 10. Una vez definido el entorno de simulación de forma completa, esta sección presenta, por un lado, los escenarios propuestos y por otro lado, la implementación completa de todo el entorno.

Simulación	
Duración Total	3000 s
Tipo de Mapas	Reales (Ciudad de Gijón)
Tasa de creación de vehículos	1v/s, 1v/1,25s, 1v/1.5s
Número de Vehículos: Escenario #1	1894/1596/1276
Número de Vehículos: Escenario #2	2601/2096/1750
Área Escenario #1	700m x 400 m
Área Escenario #2	500 m x 600 m
Número de RSU	3

Tabla 9. Parámetros de Configuración de la Simulación

Red	
Tipo de Red	WAVE / 802.11p
Frecuencia	5,890 GHz
Canal	CCH (Control)
Ancho de Banda del Canal	10 MHz
Potencia de Transmisión	-89 dBm
Tasa de Datos	18 Mbps
Tipo de Antena	Antena Omnidireccional

Tabla 10. Parámetros de Configuración de Red empleada

4.2.2.1. Escenarios

Con el objetivo de probar el sistema colaborativo basado en lógica difusa y comunicaciones vehiculares en más de un escenario, se planteó la posibilidad de implementar 2 escenarios diferentes de la ciudad de Gijón (Asturias - España) con el objetivo de contrastar la viabilidad de la propuesta. En este caso se decidió escoger un escenario del centro de la ciudad (Figura 24 - izquierda) que incorporara el mayor número de elementos posibles y otro periférico (Figura 24 - derecha), respetando, en todo momento, la ubicación urbana de los mismos.

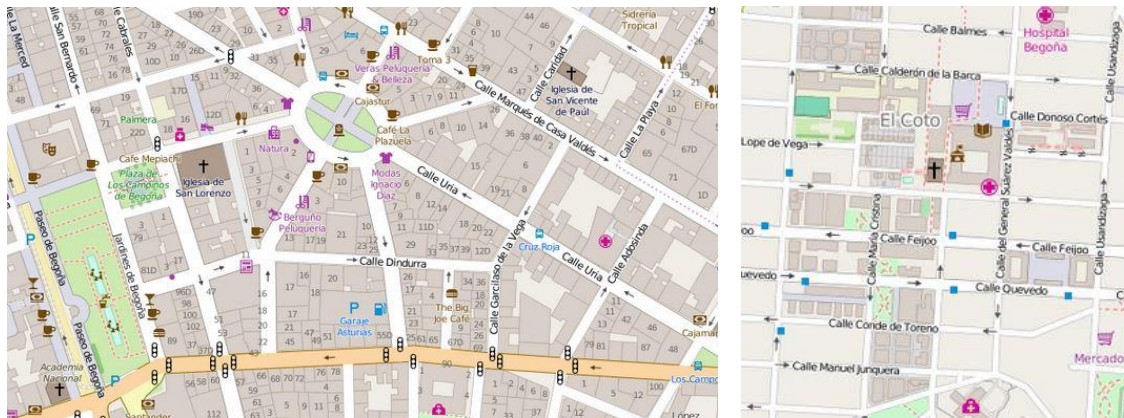


Figura 24. Escenario 1 - Centro de la Ciudad de Gijón/Xixón / Escenario 2 - Periferia de la Ciudad de Gijón/Xixón

Las dos localizaciones escogidas tienen características diferentes encontrando que el primer escenario (centro de la ciudad) está ubicado en el núcleo antiguo, teniendo calles estrechas, así como una disposición de edificios asimétrica. Además, incluye una rotonda central que facilita el cambio de dirección de los vehículos. Esta situación es muy diferente a la del caso del Escenario 2, donde comprobamos que existían vías anchas (con más de un carril en muchas de ellas), gracias a la mejor planificación urbana, así como una disposición más simétrica de las calles.

Aparte de las diferencias que presentan los escenarios en función de los viales, con los edificios también ocurre lo mismo, ya que, no sólo se distribuyen de forma más asimétrica en el Escenario 1, sino que también son edificios más altos. Este hecho es especialmente relevante cuando se elige la ubicación de las RSUs desplegadas a lo largo del escenario (3 RSUs que cubrirán todo el radio de cobertura de la zona del estudio). Es importante que se encuentren bien ubicadas, de tal manera que sean capaces de facilitar las comunicaciones de tipo V2I e I2V. Debido a todo ello, es de especial interés la ubicación de las RSUs en ambos escenarios, teniendo en cuenta tanto su área de cobertura, como la altura a la que son colocadas para que los edificios circundantes no perturben de forma abrupta las comunicaciones.

4.2.2.2. Implementación

Una vez que elegimos los escenarios, debíamos exportar los mapas de los mismos al entorno de simulación. En este caso, utilizábamos *OpenStreetMap* y transformábamos el mapa exportado para que se pudiera manejar desde el simulador de tráfico: SUMO. Este proceso se llevaba a cabo mediante el uso de NETCONVERT, aplicación incluida en el paquete de software que ofrece SUMO. Cabe mencionar que antes de la importación de los mapas, éstos se editaban en JOSM (*Java OpenStreetMap*) para eliminar líneas erróneas o vías incorrectas, así como otros elementos no relevantes creados en el manejo automático del mapa inicial.

Como ya hemos comentado anteriormente, *OMNET++* fue utilizado como simulador de red. Este simulador es extensible y permite añadir los módulos necesarios para la simulación de una red vehicular bajo el estándar IEEE 802.11p. En nuestro caso, usamos *Veins* para este tipo de escenario, pudiendo desarrollar nuevos módulos que permitan extender la funcionalidad del entorno de simulación completo.

En nuestro caso de estudio, se crearon nuevos módulos para implementar el sistema colaborativo inteligente. Estos módulos nos permitían adaptar las capas de aplicación de los vehículos y de los objetos de infraestructura (RSUs) a nuestras necesidades. De esta forma, el módulo encargado del lanzamiento de la capa de aplicación de los vehículos funcionaría en 2 fases. En primer lugar, mediante la función responsable del envío y recepción de mensajes de tipo WSM. A continuación, se activó el método que contiene las funciones del sistema de inferencia que hace uso de lógica difusa, que dependerá de los valores de entrada para tomar una decisión al respecto, la salida. Este último método es ejecutado durante toda la simulación permitiendo a los vehículos poder reaccionar cuando se detecte un incidente de tráfico cambiando, de esta forma, las condiciones del tráfico.

Cuando hablamos de la capa de aplicación de los nodos que actúan como infraestructura (RSUs), podemos decir que no utilizan el mismo método que el empleado en los vehículos debido a que éstos no realizan decisiones de toma de rutas y sus acciones están limitadas al envío/recepción de mensajes de información a los vehículos que se encuentran en su rango de cobertura.

Para poder realizar la experimentación debíamos definir las rutas que los vehículos debían seguir a lo largo de los escenarios. Con este objetivo en mente, utilizamos el script llamado *randomTrips* escrito en lenguaje *Phyton* que se incluye entre las herramientas ofrecidas por SUMO. Este script permite la creación aleatoria de rutas de vehículos atendiendo al origen y destino de los vehículos. En esta ocasión, se eligió un factor “*fringe*” de 20 para provocar que las rutas empezaran y finalizaran en los bordes del escenario obligando así, a que los vehículos entraran y salieran del escenario sin que se produjeran rutas que finalizaran en medio del mismo y que dificultarían el análisis de resultados y disminuirían la distancia que los vehículos recorren. La salida del script anterior (*randomTrips*) se introduce en el módulo DUAROUTER de SUMO, que nos permitirá calcular las rutas entre cada par origen/destino utilizando un algoritmo que

determina el trayecto más corto. En caso de ser necesario, se utiliza un modelo de movilidad por defecto llamado “*car-following*” implementado en SUMO. Llegados a este punto, cuando un vehículo necesita evitar un atasco de tráfico, las rutas cambian usando el módulo TraCI de Veins de modo que se evite la calle en la que se produce el atasco de tráfico.

Como se mencionó anteriormente, y desde el punto de vista híbrido que ofrece el simulador Veins, es posible visualizar el intercambio de mensajes tanto en el simulador OMNet++ y/o haciendo uso de la interfaz de SUMO (SUMO-GUI). En este caso, OMNet++ ofrece la posibilidad de introducir efectos visuales en su herramienta de visualización durante la simulación (Tkenv) con el objetivo de comprobar que los mensajes llegan correctamente a su destinatario y que los vehículos están infiriendo de forma correcta las condiciones de tráfico. En esta ocasión se utilizaron diferentes colores para identificar de forma inequívoca los distintos niveles de tráfico en el escenario. Encontrando: color verde para el tráfico bajo, color amarillo para tráfico medio y violeta o rojo en función de la severidad del atasco detectado.

En la Figura 25 se puede observar un ejemplo de la simulación de uno de los escenarios comprobando los diferentes colores encontrados en función del nivel de tráfico detectado por cada uno de los nodos.

Los colores mostrados también varían en función del tipo de mensaje que llega el vehículo para poder contrastar que el mensaje fue entregado a su destino. En esta ocasión atenderemos al color rosa, si es un mensaje de tráfico o naranja en el caso de estar recibiendo un mensaje WSM de alerta.

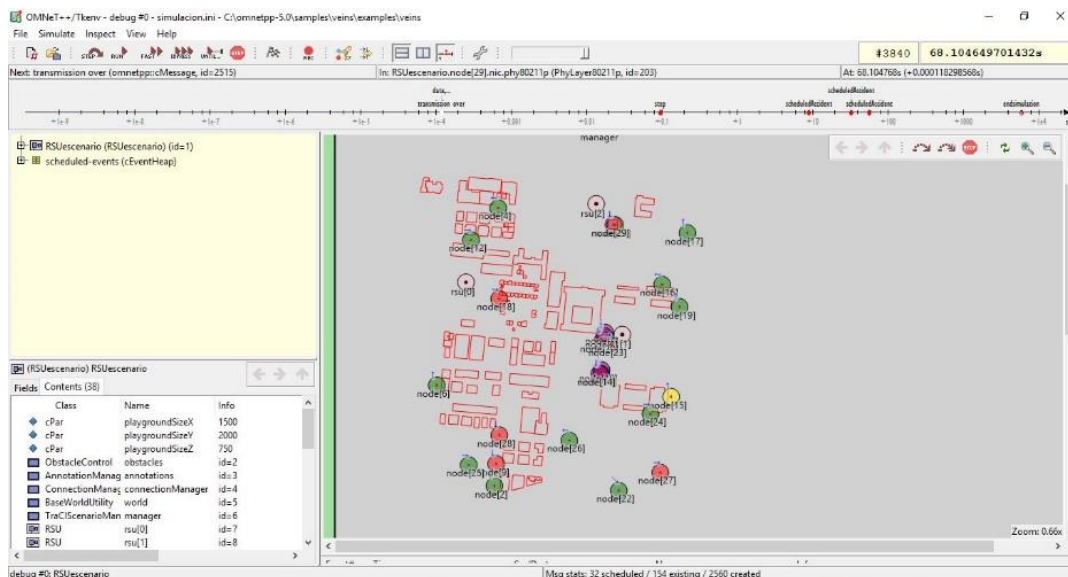


Figura 25. Vista de simulación en *Tkenv*

Para visualizar de forma más precisa el intercambio de mensajes podemos hacer referencia a la interfaz del simulador de tráfico (SUMO-GUI), donde observamos la

comunicación entre nodos con una línea de color. En la Figura 26 mostramos en el recuadro amarillo, un ejemplo de este tipo de comunicaciones para el escenario presentado en la Figura 25.



Figura 26. Extracto de la simulación en SUMO-GUI para la comunicación entre nodos

4.2.3. Resultados y Discusión

Para comprobar la efectividad del sistema diseñado, se tuvieron en cuenta dos situaciones para cada uno de los escenarios explicados en la sección anterior: uno que no hacía uso del sistema colaborativo y otro que sí que lo utilizaba. Mediante la comparación entre ambas situaciones es posible comprobar que el sistema colaborativo consigue mejorar las condiciones del tráfico y por tanto mejora las prestaciones de la red de circulación.

Con el objetivo de evaluar el sistema se realizaron un total de 12 simulaciones diferentes para cada uno de los escenarios, de las cuales 6 réplicas que hacen uso del sistema colaborativo y otras 6 que no lo hacen. Cuando se ejecutaba el escenario teniendo en cuenta el sistema colaborativo, es importante destacar que todos los vehículos lo llevaban incorporando independientemente de que lo utilizaran o no en función de la detección de incidentes en el tráfico.

A parte de la consideración mencionada anteriormente (uso o no del sistema colaborativo), también se tuvieron en cuenta diferentes tasas de creación de vehículos con el objetivo de producir más o menos afluencia de automóviles en el escenario y, por tanto, provocar más o menos atascos. Para conseguir tal fin, se hizo uso del script detallado en la sección anterior (*randomTrip.py*). Estas tasas fueron las de un vehículo cada segundo (1v/s), consiguiendo mayor densidad de tráfico, un vehículo cada segundo y cuarto (1v/1.25s), teniendo un valor de densidad de tráfico medio y un vehículo cada segundo y medio (1v/1.5s), que nos permitía simular una densidad baja de tráfico.

En ambos escenarios y situaciones permitíamos a los vehículos finalizar sus rutas antes de que finalizara el tiempo de simulación empleado. Por ello, se propuso un tiempo total de simulación de 3000 segundos. Una vez lanzada la simulación para cada una de las situaciones, recogíamos la información procesada por los vehículos y las RSUs con el objetivo de comparar ambas situaciones (con el uso del sistema y sin él) analizando las diferencias en las velocidades mínimas, medias y máximas, las emisiones de CO₂, las

aceleraciones de los vehículos y las distancias de sus rutas. En esta ocasión, las emisiones de CO₂ se calculaban teniendo en cuenta el modelo que plantea el estudio Cappiello et al. [119], y que emplea la velocidad y la aceleración de los vehículos.

Para determinar cuándo se produce una diferencia significativa en los resultados se aplicaron los análisis básicos de normalidad y homocedasticidad de la muestra en ambas situaciones (uso o no del sistema colaborativo). En el caso de la normalidad se aplicó el test de *Shapiro-Wilk*. Para la homocedasticidad se usó el test de *Levene*. Una vez que se comprobaban las dos condiciones se comprobó que todos los conjuntos de datos resultaron no ser normales y homocedásticos por lo que se utilizó el test de *Kruskal-Wallis* para comprobar si existían diferencias significativas entre los conjuntos de datos.

4.2.3.1. Escenario 1: Centro de Gijón

Este escenario, como explicamos anteriormente, estaba basado en un área del centro de la ciudad de Gijón. En este caso, la distancia media (en metros) que los vehículos recorrían se muestra en la Tabla 11.

Tasa de Creación de Vehículos	Comportamiento Por Defecto	Sistema Colaborativo
	Distancia Media (\bar{x})	Distancia Media (\bar{x})
1 v/s	594.628	619.363
1 v/1.25 s	580.953	598.302
1 v/1.5 s	561.158	578.230

Tabla 11. Distancia media recorrida por los vehículos en el escenario 1

Otro resultado relevante de esta evaluación fue obtenido atendiendo al número de vehículos que alcanzan la velocidad máxima en el escenario (50 Km/h) dependiendo de cuando se usa el sistema colaborativo o no. Vemos en la Tabla 12 como el número de vehículos incrementa de forma considerable cuando se usa el sistema consiguiendo un porcentaje mucho mayor.

Tasa de Creación de Vehículos	Comportamiento Por Defecto	Sistema Colaborativo
	Nº medio de vehículos (\bar{x})	Nº medio de vehículos (\bar{x})
1 v/s	153 (8,1%)	1843 (97,3%)
1 v/1.25 s	133 (8,3%)	1571 (98,4%)
1 v/1.5 s	93 (7,3%)	1254 (98,3%)

Tabla 12. Número de vehículos que alcanzan la velocidad máxima permitida en la vía en el escenario 1

Analizando las velocidades (v) de los vehículos (mínimas, medias y máximas) y la desviación estándar, la Tabla 13 muestra la variación del valor de velocidad en función del uso del sistema desarrollado. Podemos observar cómo se produce un incremento de velocidad en el caso del uso del sistema colaborativo.

Tasa de Creación de Vehículos	Comportamiento Por Defecto		Sistema Colaborativo	
	\bar{v}	σ	\bar{v}	σ
	Velocidad Mínima			
1 v/s	0.056	0.103	0.075	0.113
1 v/1.25 s	0.077	0.114	0.086	0.117
1 v/1.5 s	0.083	0.115	0.098	0.121
	Velocidad Máxima			
1 v/s	13.788	0.750	13.811	0.698
1 v/1.25 s	13.816	0.635	13.835	0.578
1 v/1.5 s	13.816	0.657	13.824	0.646
	Velocidad Media			
1 v/s	6.446	2.502	6.956	2.748
1 v/1.25 s	7.243	2.485	7.639	2.578
1 v/1.5 s	7.516	2.542	7.849	2.658

Tabla 13. Valores medios y desviación estándar para velocidades máximas, mínimas y medias en el escenario 1

Haciendo referencia a las Tablas 11, 12 y 13, podemos comprobar que, pese a que la longitud de las rutas aumenta (al tratar de evitar las congestiones del tráfico) los vehículos son capaces de moverse más rápido cuando se utiliza el sistema que hemos diseñado. Los resultados del test de Kruskal-Wallis muestran que estas diferencias son estadísticamente significativas para todas las tasas de creación de vehículos ($p\text{-value} < 0,01$), lo que demuestra los efectos positivos causados por el sistema colaborativo. El aumento de la velocidad también tiene un impacto significativo en la aceleración de los automóviles, ya que los cambios de velocidad se traducen en un pequeño incremento de este parámetro. La Tabla 14 muestra los valores medios y desviación estándar para esta variable (a).

Tasa de Creación de Vehículos	Comportamiento Por Defecto		Sistema Colaborativo	
	\bar{a}	σ	\bar{a}	σ
1 v/s	0.215	0.299	0.243	0.314
1 v/1.25 s	0.236	0.288	0.254	0.298
1 v/1.5 s	0.253	0.300	0.275	0.313

Tabla 14. Valores medios y desviación estándar para la aceleración (m/s^2) en el escenario 1

Como en el caso de las velocidades, las pruebas efectuadas reflejan diferencias significativas para todas las tasas de creación de vehículos ($p\text{-value} < 0.01$). Este, es un resultado lógico, ya que el flujo de tráfico mejora, lo que hace posible que los vehículos mantengan los valores de velocidad más altos en la totalidad de su trayecto a través del escenario.

Gracias a los parámetros considerados anteriormente, es posible trabajar sobre el valor total de emisiones de CO_2 que generan los vehículos de acuerdo al modelo seguido por Cappiello et al [119]. Este parámetro, cuyos valores medios (c) y desviación estándar para las simulaciones generadas se muestran en la Tabla 15, da una idea general de la contaminación causada por el tráfico en la ciudad. Como se puede observar, las

emisiones se reducen significativamente cuando se utiliza el sistema colaborativo (hasta en un 6,73%). Esta diferencia en las emisiones también puede explicarse por las características particulares del escenario. Es importante recordar, que el Escenario 1 se encuentra ubicado en el centro de una ciudad, lo que implica que los coches viajan la mayor parte del tiempo en calles de sentido único y con un número elevado de intersecciones, tendiendo a sufrir graves problemas de tráfico cuando los atascos se producen y por tanto, elevando el nivel de emisiones contaminantes al medioambiente.

Tasa de Creación de Vehículos	Comportamiento Por Defecto		Sistema Colaborativo	
	\bar{c}	σ	\bar{c}	σ
1 v/s	241.695	119.871	225.418	125.261
1 v/1.25 s	219.192	103.542	205.378	101.741
1 v/1.5 s	207.367	97.177	196.828	99.211

Tabla 15. Valores medios y desviación estándar para los niveles de emisiones de CO₂ en el escenario 1

Viendo los resultados obtenidos, las conclusiones están en línea con nuestras expectativas, ya que, cuando menor sea la densidad del tráfico en la red, más próximos serán los resultados entre el uso del sistema colaborativo y el no uso del mismo. Tal comportamiento se explica por la disminución del número de vehículos que viajan en el escenario, trayendo consigo una reducción en el número de atascos de tráfico. Esta reducción significa que los vehículos hacen un uso más bajo del sistema diseñado para reducir la congestión del tráfico porque detectan un tráfico “bajo” o “muy bajo”. Por lo que la mayoría de sus decisiones se traducirán en cambios de velocidad en lugar de cambios de ruta. Los valores experimentales que se han recogido pueden utilizarse para probar las repercusiones positivas que estos cambios de velocidad tienen en el flujo del tráfico. Sin embargo, y como en la situación original no existen casi atascos y la mayoría de vehículos siguen la misma ruta, las mejoras son menos perceptibles que cuando la densidad de tráfico es mayor.

Por otro lado, cuando hacemos referencia a los mensajes intercambiados en la red, podemos observar como en el escenario con mayor tráfico, los vehículos envían, en promedio, 1,01 mensajes, mientras que son capaces de recibir 10,78. Sin embargo, cuando se usan las tasas de creación de vehículos más bajas, el promedio de mensajes por los vehículos es de 1 exactamente, recibiendo un promedio de 5,72%, que supone prácticamente un 50% menos. En este caso, la reducción de los mensajes intercambiados de acuerdo con la tasa de creación de vehículos se refleja también en los mensajes enviados por las RSUs. Así, el número medio de mensajes enviados con la tasa más alta es de 203,33, con la tasa media de 154,67 y llegando a un valor de 136,67 con la tasa más baja.

4.2.3.2. Escenario 2: Área Periférica de Gijón

El escenario 2, como explicamos en la sección correspondiente, cubre un área periférica de la ciudad de Gijón. En esta ocasión, también se atiende a la tasa de creación de vehículos propuesta inicialmente. El motivo de la selección de la misma tasa de creación de vehículos, a pesar de tener un escenario diferente, radica en la facilidad que

propone en la comparación de los mismos, permitiéndonos comprobar los efectos del uso del sistema teniendo diferentes topologías en el tráfico.

En la Tabla 16 se muestra el número de vehículos que consiguen alcanzar la máxima velocidad dentro del escenario 2, viendo cómo, al igual que para el caso del escenario 1, el número de vehículos incrementa considerablemente.

Tasa de Creación de Vehículos	Comportamiento Por Defecto	Sistema Colaborativo
	Nº medio de vehículos (\bar{x})	Nº medio de vehículos (\bar{x})
1 v/s	229 (8.8%)	2557 (98.3%)
1 v/1.25 s	187 (8,9%)	2054 (98%)
1 v/1.5 s	151 (8.6%)	1717 (98.1%)

Tabla 16. Número de vehículos que alcanzan la velocidad máxima permitida en la vía en el escenario 2

Por otro lado, podemos observar en la Tabla 17 la distancia media recorrida por los vehículos dependiendo de la tasa de creación y del comportamiento de la simulación (con/sin sistema colaborativo). Vemos de nuevo cómo, haciendo uso del sistema colaborativo, el valor de la distancia media recorrida vuelve a incrementar al tener que modificar la ruta, lo que permitirá a los vehículos evitar posibles atascos en la vía. Observamos también, que la máxima diferencia se produce con una tasa de creación de vehículos de 1v/1.25s, siendo este valor de 42 metros, lo que implica un 6% de aumento de la distancia cuando se usa el sistema colaborativo.

Tasa de Creación de Vehículos	Comportamiento Por Defecto	Sistema Colaborativo
	Distancia Media (\bar{x})	Distancia Media (\bar{x})
1 v/s	594.628	619.363
1 v/1.25 s	580.953	598.302
1 v/1.5 s	561.158	578.230

Tabla 17. Distancia media recorrida por los vehículos en el escenario 2

Teniendo en cuenta los valores de velocidad (v) (Tabla 18), podemos observar que siguen el mismo patrón que para el caso del Escenario 1. La capacidad para reaccionar a las condiciones del tráfico cuando el sistema de colaboración se utiliza, logra una mejora sustancial en la velocidad afectando, no solo a los valores de velocidad máximos y mínimos de los vehículos sino también a la velocidad media. Una vez más, cuando aplicamos los test estadísticos correspondientes, encontramos que las diferencias son estadísticamente significativas ($p\text{-value}<0,01$).

Tasa de Creación de Vehículos	Comportamiento Por Defecto		Sistema Colaborativo	
	\bar{v}	σ	\bar{v}	σ
Velocidad Mínima				
1 v/s	0.083	0.291	0.088	0.117
1 v/1.25 s	0.106	0.122	0.106	0.121
1 v/1.5 s	0.114	0.123	0.116	0.123
Velocidad Máxima				
1 v/s	13.808	0.682	13.829	0.603
1 v/1.25 s	13.801	0.705	13.814	0.695
1 v/1.5 s	13.809	0.714	13.817	0.708
Velocidad Media				
1 v/s	7.006	2.919	7.791	2.612
1 v/1.25 s	7.985	2.618	8.311	2.478
1 v/1.5 s	8.370	2.325	8.601	2.348

Tabla 18. Valores medios y desviación estándar para velocidades máximas, mínimas y medias en el escenario 2

A la vista de los resultados, merece la pena mencionar que, como también sucedió con los datos referentes a la velocidad en el primer escenario, cuando la densidad del tráfico es baja, los resultados entre usar o no usar el sistema colaborativo son muy cercanos. La razón, como se explicó anteriormente, puede atribuirse al bajo número de atascos de tráfico producidos por la baja densidad de automóviles. Parece evidente pensar que, si encontramos un escenario en el que no se detectan atascos de tráfico, el uso o no del sistema colaborativo no reporta una mejora en las condiciones de la circulación.

Atendiendo a los valores medios y desviación estándar de aceleración obtenidos (a), vemos que, cuando se usa el sistema colaborativo, estos valores son ligeramente superiores (Tabla 19).

Tasa de Creación de Vehículos	Comportamiento Por Defecto		Sistema Colaborativo	
	\bar{a}	σ	\bar{a}	σ
1 v/s	0.187	0.242	0.209	0.256
1 v/1.25 s	0.228	0.262	0.234	0.280
1 v/1.5 s	0.224	0.246	0.227	0.248

Tabla 19. Valores medios y desviación estándar para la aceleración (m/s²) en el escenario 2

A diferencia de lo que sucedió con los datos obtenidos para el primer escenario, no hay tantas diferencias en los valores referentes a la cantidad de emisiones contaminantes de CO₂ que emiten los vehículos (c). La Tabla 20 muestra estos valores, pudiendo verificar que las emisiones son menores cuando se usan las tasas de creación alta y media.

Tasa de Creación de Vehículos	Comportamiento Por Defecto		Sistema Colaborativo	
	\bar{c}	σ	\bar{c}	σ
1 v/s	273.564	160.131	240.013	122.299
1 v/1.25 s	226.285	110.881	224.644	110.826
1 v/1.5 s	212.931	90.456	218.229	107.053

Tabla 20. Valores medios y desviación estándar para los niveles de emisiones de CO₂ en el escenario 2

Estos valores también quedan reflejados en la Figura 27, que muestra las emisiones de CO² generadas por los vehículos del escenario 2 teniendo en cuenta la tasa de creación de vehículos de 1v/s. Sin embargo, cuando se emplea una tasa de creación más baja, hay un ligero aumento en el valor de las emisiones efectuadas por los vehículos. Esto puede explicarse teniendo en cuenta la topología del escenario. Dado que el escenario abarca una zona periférica de la ciudad, hay una mayor separación entre edificios, por lo que los vehículos tienen que recorrer distancias más largas para evitar las calles congestionadas y conseguir llegar a su destino, aumentando levemente las emisiones que realizan.

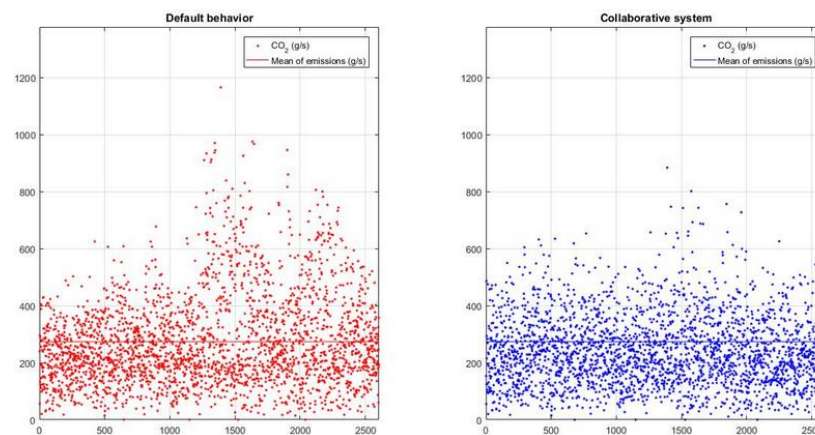


Figura 27. Emisiones de CO₂ en el escenario 2 para la tasa de creación de vehículos de 1v/s

Analizando de nuevo los parámetros mediante los test estadísticos oportunos, podemos observar como el sistema colaborativo mejora claramente la situación del tráfico cuando atendemos a la tasa de creación de vehículos más alta (mayor número de posibles atascos) obteniendo un *p-value* menor de 0,01. Sin embargo, cuando utilizamos la tasa de creación de vehículos más baja (1v/1.5s) obtenemos un *p-value* de 0,848 (> 0.05) y considerando que estos valores no representan diferencias significativas, podemos concluir que el uso o no del sistema colaborativo es indiferente, ya que no mejora las condiciones del tráfico.

En cuanto a las comunicaciones, los datos recogidos son consistentes con los evaluados en el escenario 1. Cuanto menor sea el tráfico, menor será el número de mensajes intercambiados por los vehículos. Los automóviles envían, en promedio, 1,010 mensajes cuando se crea un vehículo por segundo, siendo este valor de 1,001 cuando elegimos la tasa media de creación de vehículos (1v/1.25s) y quedando en exactamente 1 cuando la tasa es la más baja. Lo mismo ocurre con el número medio de mensajes recibidos teniendo los siguientes valores:

- Tasa Alta (1v/s): 43,96 mensajes
- Tasa Media (1v/1.25s): 31,01 mensajes
- Tasa Baja (1v/1.5s): 24,43 mensajes

Por lo que se generan un 55,58% menos de mensajes haciendo la comparativa entre las densidades de tráfico más altas y más bajas.

Dado que este tipo de escenario es más propenso a la congestión de las carreteras, es especialmente importante que las RSUs se ubiquen de forma correcta, no solamente para cubrir el mayor rango de cobertura, sino también para estar cerca de los puntos más problemáticos. De esta forma, el mayor número de conflictos localizados se refleja en un aumento en el número de mensajes enviados por la RSUs. Por lo tanto, cuando se utilizan los índices de creación de vehículos más elevados, los dispositivos envían en promedio 396,33 mensajes, siendo estos valores un 94% y un 155% más altos que en las mismas situaciones desarrolladas en el primer escenario.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que el sistema inteligente de movilidad colaborativa diseñado responde a las expectativas ya que permite disminuir el número de atascos en el tráfico, mejorando el flujo de circulación y, al mismo tiempo, disminuyendo la generación de contaminación.

4.2.4. Conclusiones

En este estudio se presenta un novedoso sistema para la mejora de las condiciones de tráfico en zonas urbanas, capaz de reducir los atascos de vehículos en la ciudad y como consecuencia la generación de emisiones contaminantes por parte de estos. El sistema se basa en el uso de comunicaciones vehiculares y lógica difusa para la detección de atascos en ciudad. A raíz de los resultados obtenidos, podemos afirmar, que el uso de la lógica difusa es mejor que la aplicación de métodos determinísticos o aleatorios que nos sirven para determinar y corregir los atascos de tráfico, y nos proporciona un nuevo sistema de control de tráfico. El despliegue del sistema colaborativo diseñado se realiza mediante el uso de redes VANET a través de comunicaciones entre vehículos y entre vehículos e infraestructura, añadiendo que la aplicación de la lógica difusa puede reducir considerablemente los atascos de tráfico y, por consiguiente, la contaminación en hasta un 12,27%.

Las simulaciones, realizadas sobre escenarios realistas ubicados en la ciudad de Gijón, también han demostrado que el sistema diseñado es eficaz, no solo en el centro de la ciudad, sino también en áreas periféricas, teniendo en cuenta diferentes densidades de tráfico y consiguiendo valores aceptables en varios parámetros estudiados como el número de vehículos que alcanzan la velocidad máxima dentro de los escenarios (teniendo un incremento medio del 89,36% de los vehículos para todas las tasas de creación en el primer escenario y del 90,10% en el caso del segundo), el aumento de la velocidad media localizada (teniendo un valor medio del incremento de velocidad del 5.93% si atendemos a todas las tasas de creación de vehículos para el caso del escenario 1, siendo un aumento del 6,01% en el caso del segundo escenario) o la reducción de las emisiones en ciudad.

Una futura aplicación del estudio realizado, puede ser el despliegue del sistema en un entorno real para comprobar la efectividad y precisión del mismo cuando los medios y circunstancias lo permitan.

Con el objetivo en mente del despliegue del sistema, hay que verificar si a los usuarios, o, mejor dicho, ciudadanos (pilar fundamental dentro de los entornos de Smart Cities), les interesa el nuevo concepto de movilidad desarrollado en este apartado, pudiendo realizar evaluaciones subjetivas sobre el uso y aplicación de este tipo de servicio.

4.3 Caso de Estudio: Wi-Fi Direct como Estándar aplicado a Comunicaciones Vehiculares

Desde hace tiempo, la búsqueda de tecnologías alternativas para la formación de comunicaciones vehiculares es un hecho contrastado, existiendo una gran cantidad de trabajos que realizan experimentos para evaluar las prestaciones de las comunicaciones atendiendo a estándares y tecnologías no específicas.

Trabajos como el realizado por S. J. Elias et al. [120], realizan estudios comparativos de diferentes protocolos IEEE 802.11 para aplicaciones no seguras en el entorno de las redes vehiculares, cuyos resultados ofrecen recomendaciones sobre los estándares más apropiados para este tipo de entornos. Otros estudios evalúan, mediante el uso de la simulación, estándares concretos (en este caso IEEE 802.11n) para el manejo de aplicaciones multimedia en VANETs realizando una comparativa con el estándar IEEE 802.11p [121]. Los resultados muestran que el intercambio de información multimedia, haciendo uso del estándar IEEE 802.11n en aplicaciones para entornos urbanos con bajo y alto BER (*Bit Error Rate*), es mejor en comparación con el estándar IEEE 802.11p.

Centrando el foco sobre trabajos relacionados con el uso de *Wi-Fi Direct* como tecnología para la realización de comunicaciones inalámbricas vehiculares, encontramos investigaciones donde se estudian las comunicaciones mediante el uso de esta tecnología cuantificando los retrasos esperados entre dispositivos para el establecimiento de la conexión (posible problema a la hora de aplicar esta solución) [122]. Estudios más recientes [123], realizan, mediante entornos simulados, comunicaciones (usando la tecnología *Wi-Fi Direct*) entre dispositivos en entornos de ciudades inteligentes. Para ello, desarrollan un algoritmo dinámico que cambia los canales de operación y consigue un mayor rendimiento dejando ver los beneficios del uso de este tipo de tecnologías en entornos de ciudades inteligentes, ubicación del centro de las investigaciones de la presente Tesis Doctoral.

Por todo lo explicado anteriormente, la presente sección presenta un completo caso de estudio para la comunicación inter-vehicular en ciudades haciendo uso de la tecnología *Wi-Fi Direct* y comprobando la viabilidad de la solución propuesta en diferentes escenarios y bajo ciertas condiciones de distancia y velocidad de vehículos. En este caso, se equipa al vehículo con un teléfono móvil con Sistema Operativo Android, en el que está corriendo una aplicación diseñada para este tipo de comunicación. Dicha

aplicación, es capaz de inferir el estado actual del tráfico teniendo en cuenta variables como el tiempo en el que está circulando lento o incluso llega a detenerse y el número de mensajes recibidos de otros vehículos para, de esta forma, poder determinar cuándo se produce una incidencia en carretera. Cada vehículo es capaz de transmitir, a través del dispositivo embarcado, la información recopilada a los demás usuarios de la vía cuando estos están en su rango de cobertura.

4.3.1. Introducción a Wi-Fi Direct

Wi-Fi Direct presenta una certificación desarrollada por Wi-Fi Alliance, teniendo su base en una tecnología inalámbrica que permite a varios dispositivos (que incorporen Wi-Fi) la conexión entre sí sin necesidad de puntos de acceso intermedios [124].

Entre los servicios con los que cuenta la tecnología encontramos:

- **Servicio de Envío:** Donde uno o varios dispositivos pueden recibir/enviar información de forma sencilla con la mínima interacción por parte del usuario (deseable en los entornos vehiculares).
- **Servicio DLNA:** Del inglés *Digital Living Network Alliance*, permite a los dispositivos que soportan la tecnología comunicarse entre sí de forma sencilla con el propósito de compartir contenidos de forma directa.
- **Servicio Miracast:** En este caso, los dispositivos pueden habilitar la pantalla en modo espejo para poder visualizar de forma simultánea diversos ficheros multimedia (audio y vídeo) en varios dispositivos, siendo capaces de obtener una visualización de información compartida (a la vez).

La tecnología *Wi-Fi Direct* está basada en la formación de redes P2P creando un grupo entre los nodos que quieren proceder a la conexión. Entre estos dos nodos existen 2 perfiles diferenciados: Propietario del grupo (que es el que actúa como “dueño” resolviendo las peticiones de conexión) y clientes (que son el resto de nodos que intentan realizar la conexión). Para crear el grupo, los nodos realizan un proceso de negociación mediante el cual determinan, qué nodo será el propietario del mismo. A la hora del establecimiento de grupos es importante atender a las diferentes técnicas existentes [122]:

- **Formación Estándar:** Dentro de esta formación encontramos un autodescubrimiento inicial por parte de los nodos, comenzando la fase de negociación para determinar cuál será el propietario del grupo. Al concluir esta fase se establece una comunicación segura (mediante el uso de *Wi-Fi Protected Setup* (WPS)). En este caso, el nodo que sea el propietario del grupo actuará como servidor DHCP asignando direcciones a los clientes.

- **Formación Autónoma:** En esta ocasión, un dispositivo es capaz de crear de forma autónoma un grupo P2P convirtiéndose directamente en propietario del grupo. El resto de dispositivos buscarán al propietario de igual forma que buscan a otros dispositivos dentro de la red. Esta formación es más adecuada que la estándar para su uso en entornos vehiculares al actuar de forma autónoma sin fase de negociado previa.
- **Formación Persistente:** En el momento de la creación de un grupo, éste puede ser marcado como “Persistente” mediante la activación de un *flag*. El objetivo es el mantener el rol de los nodos que lo forman (propietario y clientes) y los parámetros de red, como la IP, a lo largo del tiempo. De esta forma optimizamos tiempos en la generación de grupos al tener un conocimiento previo del dispositivo que se conecta.

Fue en octubre de 2011 cuando Google anunció soporte para la tecnología *Wi-Fi Direct* en sistemas Android 4.0 (o superiores en la actualidad). Partiendo de esa base, el sistema que se usa en el presente estudio hace uso de dispositivos con Sistema Operativo Android que soportan una versión superior a la 4.0 y que implementan *Wi-Fi Direct*.

4.3.2. Descripción del Sistema de Comunicaciones Vehiculares Basado en Wi-Fi Direct

El sistema de comunicaciones vehiculares basado en *Wi-Fi Direct*, presenta su base en el diseño e implementación de una aplicación, llamada *Notway*, que es capaz de detectar la ocurrencia de un “posible atasco” o un “ataasco seguro” dentro de un entorno urbano. La toma de decisiones se hace en base a la información recogida por el propio dispositivo móvil, dependiendo de su posición y velocidad, y también de la información que recibe de los otros vehículos que circulan en su entorno.

En esta sección se presenta el diseño del sistema de comunicaciones haciendo referencia a tres componentes básicos: Aplicación móvil, basada en *Wi-Fi Direct* para la comunicación entre vehículos, el algoritmo de decisión elegido para la detección de atascos y el esquema de comunicación que usan los vehículos mediante la utilización de la aplicación móvil.

4.3.2.1. Aplicación Móvil

La aplicación móvil, llamada *Notway*, está desarrollada en un entorno Android, haciendo uso del SDK *Android Studio*. Básicamente, está compuesta por 2 pantallas principales de información. En primer lugar, encontramos la pantalla de información general, en la que aparecen datos referentes a la velocidad del vehículo, el aviso de eventos detectados, los tiempos para la detección de eventos, la conexión entre dispositivos (asociación P2P) y una lista con los eventos detectados por los vehículos. La segunda pantalla de información, muestra un mapa con los datos recogidos por el

dispositivo móvil (ubicado en el vehículo), así como la posición en la que nos encontramos, determinando la calle en la que se detecta el evento de tráfico puntual.

En la Figura 28, podemos observar las dos pantallas de información detalladas con anterioridad para poder entender los conceptos expuestos para cada una de ellas.

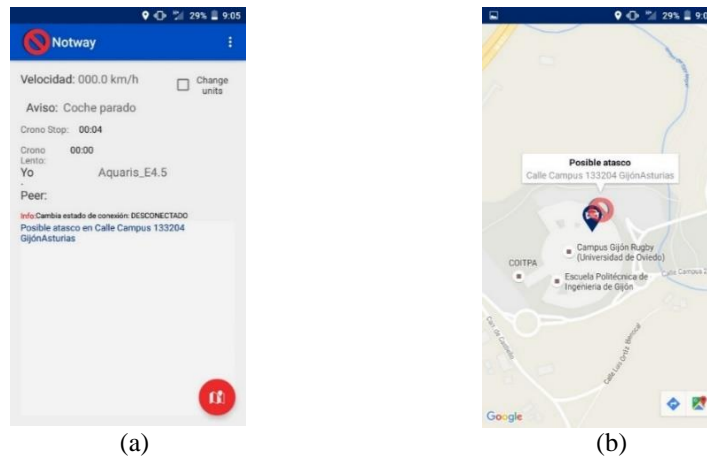


Figura 28. Pantallas de Información - (a) Pantalla de Datos Generales - (b) Pantalla de Datos con Representación de Eventos en Mapa

Al encontrarnos en un entorno vehicular, el uso de la aplicación debe estar limitado por parte del conductor, con el fin de mantener la seguridad y la atención en el periodo de conducción. Debido a ello, nuestra interacción con la aplicación será la de iniciarla al abrirse (pulsando sobre el botón “INICIAR”). A partir de ese momento, la aplicación será la encargada de detectar y calcular la información, así como compartirla con los demás vehículos.

Para mejorar la usabilidad de la aplicación dentro del habitáculo del vehículo, durante las pruebas experimentales se utilizó un dispositivo de tipo HUD. Este tipo de aparatos incorporan una pantalla transparente que puede ser ubicada en el campo de visión del conductor permitiéndole visualizar tanto la propia pantalla como la vía por la que circula. En la Figura 29 podemos observar la aplicación en ejecución haciendo uso de un dispositivo real incluido en una de las pruebas experimentales que se llevaron a cabo.



Figura 29. Aplicación desplegada sobre el dispositivo HUD en un entorno real de pruebas

La aplicación tiene en cuenta diferentes eventos en relación al estado del tráfico y la propia ubicación del vehículo. A forma de resumen, la Tabla 21 muestra los eventos detectables por la aplicación, así como el icono que aparece en pantalla cuando tiene lugar (información de mapa) y una breve explicación del mismo.

Evento	Icono	Descripción
Posición Actual		Indica la posición actual del vehículo
Posible Atasco		Detecta la posibilidad de atasco en una vía
Atasco		Detecta un atasco seguro en una vía
Posible Tráfico Lento		Detecta la posibilidad de tráfico lento en una vía
Tráfico Lento		Detecta un tráfico lento seguro en una vía

Tabla 21. Eventos detectados por la aplicación para comunicaciones vehiculares

Para la detección de cada uno de los eventos representados en la Tabla 21 (posible atasco, atasco, posible tráfico lento y tráfico lento), se requieren una serie de condiciones que serán explicadas en el siguiente apartado de la sección donde se determina el funcionamiento del Algoritmo de Decisión empleado.

4.3.2.2. Algoritmo de Decisión

La implementación del algoritmo de decisión planteado, toma en consideración los eventos definidos en el apartado anterior (3.2.2.1 Aplicación Móvil), que atienden a diferentes situaciones en carretera.

En este caso, cada vehículo es el encargado de detectar los eventos y procesarlos, teniendo en cuenta el tiempo en el que transcurren o las repeticiones de los mismos. De este modo, un vehículo puede procesar la información del estado actual de la vía que posteriormente será retransmitida a otros vehículos cercanos a su entorno.

El algoritmo de decisión, hace uso de 2 listas de datos para la información de eventos o incidencias, mediante las cuales podrá comprobar las ocurrencias que el propio vehículo registra (Lista A) y las que le envía otro vehículo (Lista B). Realizando una simple comparación entre ambas, el vehículo es capaz de determinar si se trata de una nueva incidencia o un problema ya controlado anteriormente (por la recepción de información de otro vehículo). En caso de que la incidencia sea distinta a las que tenemos almacenadas, pero ubicada en la misma calle, procederemos a calcular las distancias entre ellas, debido a que un atasco o retención puede prolongarse varios metros en un rango de distancia máxima de 100 metros. La elección de este parámetro se basa en la recomendación de una distancia adecuada para evitar una posible retención o atasco

provocado por señales de tráfico o semáforos y evitar, de esta forma, un posible problema de “*broadcast storm*” dentro de este tipo de redes [114].

Atendiendo a los eventos que el algoritmo puede encontrar, detectamos dos tipos: eventos posibles, que expresan la posibilidad de que alguna incidencia esté ocurriendo en la vía, y eventos seguros, que serán eventos que determinan que un evento se produce. Los eventos posibles, son aquellos que “puede” que se den, pero no es seguro que se produzcan. Un claro ejemplo de ello sería la realización de una parada obligada (por cualquier razón) que no impide que los demás vehículos prosigan su marcha. Dentro del caso de los eventos seguros, encontramos la definición “segura” de que un evento se está produciendo dentro de una vía. En este caso el algoritmo, a través de un contador, lleva la cuenta de las veces que se repite un evento posible en un rango limitado de vía. En caso de que ese contador se incremente un número de veces mayor a 3, el evento pasará de ser posible a seguro, obteniendo la información de 3 fuentes (incluidos nosotros) que se repiten en una distancia acotada (100 metros) y cambiando el icono que se muestra en el mapa. Estos valores son tomados como una primera aproximación a la solución del problema de la movilidad en ciudad basándonos en las características de las vías y la afluencia media de vehículos en las mismas. Así mismo, una posible mejora de este sistema, sería el ajuste dinámico de estos valores atendiendo al estado actual del tráfico.

Con el fin de agilizar la comunicación y el almacenamiento de información cuando se produce una comunicación efectiva entre vehículos, la segunda lista (lista recibida desde el vehículo emisor - Lista B) será eliminada. El vehículo quedará entonces con la lista propia (Lista A) actualizada, que será capaz de enviar cuando se produzca una nueva comunicación con otro vehículo próximo repitiendo el proceso de cálculo de eventos o incidencias en ciudad.

4.3.2.3. Esquema de Comunicación

El esquema de comunicación se basa en una interconexión punto a punto (P2P) entre dos dispositivos móviles embarcados en el vehículo (aunque podría interactuar como infraestructura), que hacen uso de la aplicación desarrollada.

La Figura 30 muestra el esquema básico de comunicación P2P mediante el uso de *Wi-Fi Direct* entre dispositivos con la aplicación *Notway* corriendo en los dispositivos. En este caso, la comunicación se hará efectiva cuando los vehículos se encuentren en el radio de cobertura y se produzca la asociación entre pares para el posible intercambio de información entre vehículos.



Figura 30. Esquema de Funcionamiento de Comunicaciones

4.3.3. Caso de Estudio Controlado

Para comprobar el uso del sistema desplegado, se han diseñado diferentes escenarios de comunicaciones variando la velocidad de los vehículos y la distancia a la que se encontraban. El diseño de las evaluaciones experimentales se ha basado en los posibles tipos de comunicación dentro de una red vehicular, encontrando: Comunicación I2I, donde dos vehículos están parados e intercambian información a diferente distancia (dentro del rango de cobertura). Comunicación V2V, donde se produce un cruce de vehículos a diferentes velocidades y también un intercambio de información de vehículos circulando en la misma dirección. Por último, Comunicación V2I/I2V haciendo referencia a la movilidad de un vehículo (con velocidad variable) y a otro vehículo estático actuando como infraestructura de carretera (RSU).

El escenario planteado, para el caso de estudio controlado, hace referencia a un entorno real urbano situado a las afueras de la ciudad de Gijón (España), más concretamente, en las proximidades de la Universidad de Oviedo. La Figura 31, muestra el circuito en el que se realizaron las pruebas y que se resalta en color amarillo en la imagen.

Pese a que el escenario pertenece a una zona universitaria de la ciudad de Gijón en la que los vehículos transitan normalmente con un nivel bajo de afluencia, la realización de las pruebas se hizo en horario no laboral (fin de semana) y franja horaria vespertina, con el fin de minimizar el riesgo en la seguridad que supondría incluir el sistema sin la realización de pruebas controladas.



Figura 31. Escenario de pruebas para el caso de estudio controlado

4.3.3.1. Comunicaciones I2I (Caso Ideal)

El caso ideal, referenciando al escenario propuesto anteriormente (Figura 31), de comunicación entre dispositivos, se produce cuando encontramos dos vehículos sin movimiento (velocidad = 0), que están en el radio de cobertura y el tiempo suficiente para que se produzca un intercambio de datos adecuado (pudiendo actuar como infraestructura) sin que existan interferencias en la señal. En este caso, la cantidad de información transmitida es la almacenada en las listas implementadas en la propia aplicación, por lo que estaríamos hablando de unos pocos KB de datos.

Para la realización de estas pruebas, se tuvieron en cuenta únicamente las diferentes distancias de los vehículos (ya que la velocidad era 0), estudiando los tiempos de conexión y comunicación de los nodos. Las distancias establecidas fueron: <5 metros,

50 metros y 100 metros (rango de cobertura máximo mediante el uso de la tecnología *Wi-Fi Direct*).

4.3.3.2. Comunicaciones V2V

Respecto a la parte de comunicaciones V2V encontramos 2 tipos de pruebas: Cruce de vehículos y vehículos en la misma dirección.

La primera de ellas (Cruce de Vehículos) se realizó dentro de la recta comprendida en el escenario propuesto (Figura 31), atendiendo a un cruce de vehículos a diferente velocidad. De esta forma, éramos capaces de comprobar si la comunicación se hacía efectiva con la situación más desfavorable, debido a que el tiempo de exposición para la comunicación es más reducido y el rango de cobertura disminuye rápidamente. En este caso, atendimos a diferentes velocidades de los vehículos que están detalladas en la Tabla 22.

Prueba ID	Velocidad (Km/h)	Velocidad de Cruce (Km/h)
#C.1	15	30
#C.2	30	60
#C.3	50	100

Tabla 22. Parámetros de Velocidad de la Prueba Comunicación en Cruce de Vehículos (V2V)

Los rangos de velocidades fueron tomados en función de las velocidades; mínima (considerando una velocidad baja los 15 Km/h), media, y máxima (permitida por ley en España) para circular en entornos urbanos.

Por otro lado, el objetivo planteado en la segunda prueba para este tipo de comunicación (vehículos en la misma dirección) era el de evaluar la comunicación inter-vehicular que se producía entre los dos vehículos, que se encontraban dentro del radio de cobertura mientras circulaban a diferentes velocidades. De este modo, podíamos evaluar si era posible un intercambio aceptable de información cuando el tiempo de exposición de los vehículos era adecuado para producir un intercambio de datos.

Para llevar a cabo esta prueba, se tuvieron en cuenta dos situaciones: vehículos que circulan a la misma velocidad (en la misma dirección) y vehículos que circulan a velocidades diferentes (produciéndose un adelantamiento). La Tabla 23 resume los parámetros de velocidad de la prueba de comunicación V2V para vehículos que circulan en la misma dirección.

Prueba ID	Velocidad (Km/h)	Velocidad de Cruce (Km/h)
#D.1	20	0
#D.2	30	0
#D.3	50	0
#D.4	Vehículo 1: 20	20
	Vehículo 2: 40	

Tabla 23. Parámetros de Velocidad de Prueba de Comunicación de Vehículos en Misma Dirección (V2V)

4.3.3.3. Comunicaciones V2I/I2V

La última prueba de comunicación estudiada se basa en el tipo de comunicación V2I o I2V, planteando la posibilidad de realizar una prueba con un vehículo parado (que actúe como RSU) y otro en movimiento. Para llevar a cabo este tipo de comunicaciones se propusieron diferentes velocidades definidas en la Tabla 24 realizando la comunicación en ambos sentidos.

Prueba ID	Velocidad (Km/h)
#E.1	15
#E.2	30
#E.3	50

Tabla 24. Parámetros de Velocidad de la Prueba de Comunicación de Tipo V2I - I2V

De nuevo, las velocidades son elegidas respetando el límite de velocidad establecido por ley en España (de 50 Km/h) y atendiendo a las velocidades medias y mínima (bajo propia consideración) de circulación en ciudad. La Tabla 24 no muestra velocidad de cruce porque, ésta, correspondería a la velocidad que lleva el propio vehículo al encontrarse con el otro parado (velocidad = 0).

4.3.4. Caso de Estudio Real

Con el fin de comprobar el funcionamiento del sistema creado dentro de un entorno de ciudad real (no controlado), se optó por la realización de un estudio de viabilidad en Gijón (España). El sistema fue desplegado en 2 vehículos obteniendo un caso de estudio real de comunicación vehicular en un entorno real. La Figura 32 muestra el área aproximada en la que se introdujo el sistema.



Figura 32. Área aproximada real del escenario para la evaluación de la prueba de viabilidad del sistema en la ciudad de Gijón

En este caso, se llevaron a cabo comunicaciones de tipo V2V (con cruce de vehículos y vehículos en la misma dirección) y V2I/I2V, adecuando siempre las velocidades y distancias a las condiciones de tráfico en el horario en el que se efectuaron las pruebas (horario laboral vespertino).

Mediante la realización del presente caso de estudio, se pudo verificar el funcionamiento del sistema propuesto planteado dentro de un entorno real en el que pueden producirse interferencias o distorsión en la señal y la comunicación podría sufrir pérdidas.

4.3.5. Discusión de Viabilidad de la Propuesta

La discusión de los resultados se presenta en función de las pruebas realizadas anteriormente, analizando tanto los resultados de viabilidad obtenidos en el caso de estudio controlado como los resultados obtenidos en el caso de estudio real. Nos referiremos a cada una de las pruebas, haciendo mención a la identificación (Prueba ID) presente en cada una de las tablas presentadas en la Sección 4.3.3.

4.3.5.1. Caso de Estudio Controlado

En referencia al caso de estudio controlado (realizado en el entorno del Campus de Gijón de la Universidad de Oviedo), se discutirán los resultados en función de la totalidad de las pruebas realizadas. Para ello tenemos en cuenta las pruebas de: Comunicaciones I2I, Comunicaciones V2V y Comunicaciones V2I/I2V.

Comunicaciones I2I

Teniendo en cuenta las distancias, ya mencionadas anteriormente en la sección 4.3.3.1 (<5m, 50m y 100m), podemos concluir que la comunicación se realizaba de forma efectiva en cada una de ellas, transmitiendo sin pérdida de información los datos que la aplicación era capaz de recoger durante el proceso de ejecución. En la Figura 33 podemos observar el intercambio de información (ya efectuado) en las dos pantallas de los dispositivos (cliente y servidor) para corroborar que la información había sido transmitida correctamente.

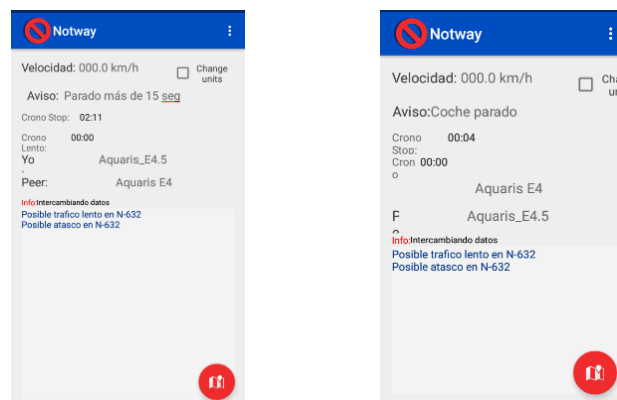


Figura 33. Ejemplo de Intercambio de Información para el Caso de Comunicaciones I2I con una distancia de 50 metros

Vemos como, finalmente, los dos dispositivos tienen las mismas incidencias y se han vinculado de forma correcta para hacer el intercambio de información. En este caso, “Posible tráfico lento en N-632” y “Posible atasco en N-632”.

Comunicaciones V2V

Para el caso de las comunicaciones V2V, y como ya dijimos anteriormente, atenderemos a las dos posibles formas de intercambio de información: Cruce de vehículos (a la misma velocidad) y vehículos circulando en la misma dirección (a diferente velocidad, para que se produzcan adelantamientos).

El caso más desfavorable se produce cuando dos vehículos se cruzan a la máxima velocidad (50 Km/h en nuestras evaluaciones), debido a que el tiempo de exposición entre ambos para el intercambio de información es el más bajo. En esta ocasión, la comunicación se producía sin ningún impedimento teniendo en cuenta la totalidad de las velocidades explicadas en la Tabla 23 de la sección 4.3.3.2 para las pruebas #D.1, #D.2 y #D.3.

Cuando hacemos referencia al caso en el que los vehículos circulan en la misma dirección, pero a diferente velocidad (se produce un adelantamiento) también podemos corroborar que en el 100% de las ocasiones el vehículo cumple con el objetivo de transmitir información al otro nodo de la red, quedando constancia de que para este tipo de prueba el uso de la tecnología *Wi-Fi Direct* cumple con las hipótesis iniciales produciendo un resultado parecido al del caso anterior (Figura 33).

Comunicaciones V2I/I2V

Cuando hablamos de intercambio de información entre un objeto móvil y otro no móvil (infraestructura) hacemos referencia a dos tipos de comunicación dependiendo de la dirección del envío y recepción de datos. En esta ocasión, se efectuaron pruebas de campo en ambos sentidos teniendo comunicación de tipo V2I e I2V. Es decir, se empleó la arquitectura cliente-servidor dentro de los grupos creados dentro de *Wi-Fi Direct* para que en unas ocasiones el cliente fuera el vehículo y en otras lo fuera el elemento de infraestructura (teléfono móvil ubicado al borde de la carretera).

Como resultado de las pruebas realizadas a diferentes velocidades (15, 30 y 50 Km/h) se obtiene un intercambio de información aceptable, encontrando la propuesta viable en ambos casos (comunicaciones tipo V2I y comunicaciones tipo I2V). La Figura 34, muestra un ejemplo del intercambio de información entre dispositivos cuando la velocidad era de 30 Km/h en el vehículo (siendo 0 para el caso de la infraestructura), pudiendo corroborar que la información ha sido transmitida de forma correcta entre los dispositivos, teniendo los dos vehículos la misma información sobre posibles atascos.

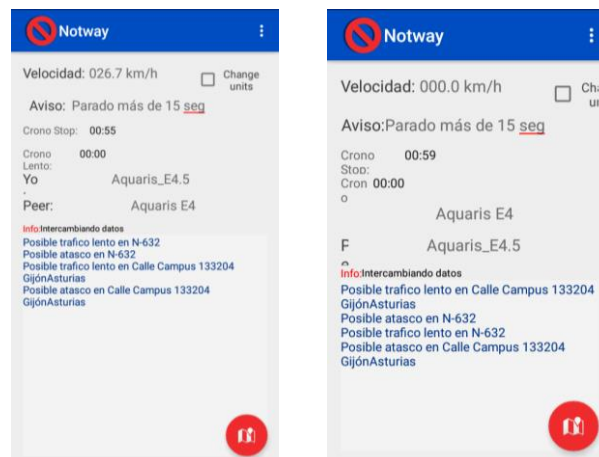


Figura 34. Ejemplo de intercambio de información en el caso de comunicación V2I a velocidad de 30 Km/h

Continuando con el caso de estudio para las comunicaciones de tipo V2I/I2V y posterior al intercambio de información realizado entre los dispositivos sobre el estado actual de la vía, encontramos que, al estar el propio cliente desplazándose lentamente durante un tiempo e incrementando (junto a los mensajes recibidos del servidor) el contador que hace que un posible tráfico lento pase de estado “posible” a “seguro” (como se explica en la sección 4.3.2.2) se detecta la ocurrencia de un evento de tráfico lento viendo en la pantalla el mensaje de “¡ATENCIÓN!: Tráfico lento en Fojanes Gijón Asturias” (Figura 35).

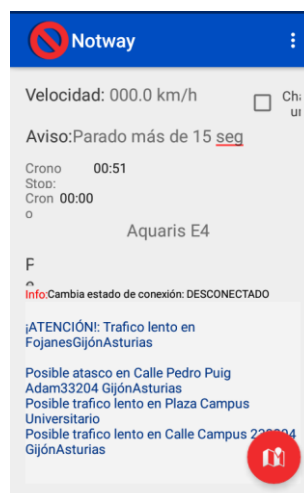


Figura 35. Detección real de un evento de tráfico lento

4.3.5.2. Caso de Estudio Real

El caso de estudio planteado sobre el escenario real (Gijón) es el menos favorable a la hora de implementar la tecnología en su estado actual. En este caso, se efectuaron 10 repeticiones de comunicaciones de tipo V2V y otras 10 de tipo V2I/I2V para corroborar de forma efectiva la viabilidad de la propuesta.

Pese a que el 70% de las ocasiones los dispositivos embarcados eran capaces de intercambiar información de forma correcta, el 30% restante no se comunicaban debido a la falla que se produce cuando los dispositivos detectan y vinculan a otros pares que hacen uso de la tecnología *Wi-Fi Direct* en ciudad. Esto se debe a que el código de la aplicación fue implementado haciendo que la red trabajara de forma automática en el reconocimiento de pares (con el objetivo de no tocar la aplicación para realizar el “*peering*” entre dispositivos).

Aunque, como ya hemos comentado, podemos conseguir realizar la comunicación en la mayoría de ocasiones, en otros casos es imposible alcanzar la comunicación por la conexión del par con otro nodo de la red que hace uso de la tecnología. La Figura 36 presenta un ejemplo de fallo de la aplicación, ya que, en vez de conectar al nodo que tiene corriendo el software correspondiente, se conecta a una TV del entorno próximo, haciendo imposible el intercambio de información entre ambos dispositivos, por lo que la información de “*Posible atasco en Avenida del Llano*” nunca llegó al dispositivo cliente y la notificación no fue efectiva.

A pesar de ello, vemos un alto grado de funcionalidad correcta, quedando demostrada la viabilidad de la solución mediante el incremento de nodos a la red VANET que incorporen la tecnología (al tener mayor cantidad de información, existe mayor posibilidad de recibirla de algún par, bien sean vehículos o infraestructuras), con la obligación de tener en cuenta los problemas de “*broadstorm*” [125] que se puedan producir en este tipo de redes y que quedan fuera del ámbito del presente estudio.



Figura 36. Conexión a nodo no deseado en escenario real

4.3.6. Conclusiones

En el estudio desarrollado se presenta el diseño y experimentación real de un sistema de comunicaciones vehiculares móviles (V2V - V2I/I2V) para entornos de movilidad inteligente que es capaz de detectar posibles atascos en ciudades y notificar dicha situación a otros vehículos cuando estén en su rango de comunicación vía *Wi-Fi Direct*.

Si bien es cierto que las comunicaciones son efectivas haciendo uso de la tecnología *Wi-Fi Direct*, debemos tener en cuenta que está condicionada por factores limitantes como

la velocidad o la distancia entre los nodos, características muy importantes dentro de una red VANET, así como de otros factores dependientes de la tecnología como el tiempo de asociación de pares o las interferencias producidas por otros dispositivos que incorporan interfaces de comunicación similares.

A la vista de la discusión efectuada en el apartado anterior, podemos concluir que en situaciones de velocidad media-baja (máximo de 50 Km/h, por estar en ciudad), la tecnología puede ser adecuada para cubrir el objetivo con el que fue diseñada: enviar información en tiempo real a los vehículos acerca del estado de la carretera para considerar la posibilidad de elección de rutas alternativas al encontrar eventos no deseados en carretera. A raíz de los resultados, podemos concluir que este tipo de tecnología puede ser empleada como sistema soporte a una red vehicular completa que emplee, por ejemplo, estándares dedicados a este tipo de entornos, como IEEE 802.11p y que proporcionan servicios adicionales dentro del ámbito urbano y habiendo realizado una evaluación de viabilidad del sistema en una ciudad real (Gijón).

Teniendo en cuenta las limitaciones existentes, y ya mencionadas anteriormente, como trabajo futuro dentro de este ámbito planteamos la posibilidad de ampliar el sistema de comunicación atendiendo a otras tecnologías apropiadas para este tipo de intercambio de información como *Bluetooth LE* o *Wi-Fi Aware* que podría ofrecer un rendimiento aceptable para esta clase de servicios.

También se consideró importante la optimización de la aplicación de intercambio de información, usando la misma u otras tecnologías ya mencionadas, no solo desde el punto de vista de la mejora del algoritmo de decisión y variables tomadas en cuenta en este estudio, sino también en función de los tipos de comunicación especificado en el presente estudio (I2I, V2V o V2I/I2V), teniendo en cuenta una comunicación simultánea con varios dispositivos a la vez (entre vehículos o con infraestructura) para solucionar los problemas de las conexiones P2P. También se considerará la inclusión de mecanismos para la realización del envío y recepción de información, correspondientes a la otra gran línea de investigación dentro de los C-ITS.

4.4 Contribuciones del Capítulo

Según diversos estudios, el vehículo es uno de los principales agentes contaminantes en los entornos urbanos [126]. Ante el creciente número de automóviles en carretera, la necesidad de una gestión eficiente y coordinada del tráfico en ciudad se convierte casi en una obligación. Por tanto, la contribución más importante del capítulo no es otra que el despliegue de un sistema que nos permita paliar, o incluso eliminar los atascos de tráfico que se producen en la ciudad. Para ello, se hace uso de dos conceptos clave:

- **Lógica Difusa** (Fuzzy Logic), que será la encargada de determinar, mediante un sistema de inferencia, cuándo se produce un atasco atendiendo a diferentes variables.

- **Comunicaciones Vehiculares**, que se encargarán de la difusión del estado actual de la vía dentro de una red VANET usando tanto comunicaciones V2V como V2I/I2V y permitiendo a los vehículos la posible selección de una ruta alternativa para alcanzar su destino.

Mediante el caso de estudio propuesto, queda patente la posible mejora que este sistema aportaría en una implementación real, obteniendo unas reducciones de emisiones de CO₂ que pueden llegar hasta el 12,27%.

Por otro lado, encontramos otra importante contribución en la creación de un plan de movilidad inteligente (vinculado al Capítulo 3 y base de la presente Tesis Doctoral), que puede dar lugar a una mejora sustancial de la circulación del tráfico en entornos urbanos. De esta forma, los vehículos que transitan por la ciudad, pueden reducir los tiempos de espera provocados en posibles retenciones o atascos de tráfico y, consecuentemente, disminuir el número de emisiones que éstos realizan al medioambiente.

Mediante el diseño, implementación y despliegue de este sistema basado en la detección de atascos mediante un enfoque de inferencia de lógica difusa y comunicaciones vehiculares dentro de una red VANET, vemos cómo el flujo de tráfico en ciudad puede mejorar ostensiblemente. De esta forma, se pueden llegar a paliar los efectos negativos que implican las políticas restrictivas implantadas por los gobiernos en las ciudades y que limitan, en cierta medida, el ritmo de vida de los ciudadanos, pilar fundamental del concepto de Ciudad Inteligente.

Por otro lado, ante el alto coste y falta de investigación de las tecnologías aplicadas al mundo real de las comunicaciones vehiculares mediante la dotación de interfaces de comunicaciones y mecanismos de gestión de información apropiados, como el IEEE 802.11p/WAVE 1609, se hace indispensable el enfoque del despliegue de nuevos sistemas tecnológicos que permitan comunicaciones inter-vehiculares haciendo uso de tecnologías accesibles para desarrollar y desplegar nuevos servicios que mejoren la eficiencia y la seguridad en la conducción.

Bajo ese pretexto, la principal contribución del presente capítulo se basa en la aplicación de tecnologías comerciales (y de fácil acceso) para el despliegue de un sistema de comunicaciones inter-vehiculares con el objetivo de conseguir proveer de información útil y en tiempo real sobre el estado de la vía a los conductores. Para ello, y haciendo uso de la tecnología *Wi-Fi Direct* (disponible en la mayoría de los *smartphones* actuales), se implementó una aplicación capaz de comunicar dispositivos mediante el intercambio de información sobre el tráfico en tiempo real. Cada dispositivo (con la aplicación Android instalada) era capaz de detectar cuando se producía un “posible atasco” o un “ataasco seguro” estudiando diferentes variables calculadas por el propio sistema o recibidas de otros vehículos dentro de su rango de cobertura. De esta forma, podíamos llegar a ser conscientes del estado de la vía en tiempo real mediante la visualización de diferentes tipos de datos (alfanuméricos o representaciones en mapas).

Este hecho supone un avance en la capacidad del conductor para la toma de decisiones en el proceso de conducción, pudiendo cambiar la selección de su ruta predefinida al conocer cómo son las condiciones actuales de las carreteras del entorno.

Los resultados obtenidos, mostraron la viabilidad de la propuesta, bajo ciertas condiciones de velocidad, como posible soporte de servicio a los sistemas de comunicación vehicular que usan tecnologías de tipo DSRC mediante estándares dedicados a las comunicaciones vehiculares como el IEEE 802.11p. Podemos vislumbrar un amplio abanico de nuevos despliegues de servicios dentro de los entornos urbanos que ofrezcan al ciudadano una mayor cantidad de información útil y por tanto, un mayor confort en carretera.

Capítulo 5

5 Usabilidad de Dispositivos Embarcados en Entornos de Redes Vehiculares

Debido al incremento de servicios que se encuentran en entornos de Redes Vehiculares, los conductores obtienen una mayor cantidad de información que, en muchas ocasiones, puede reducir la seguridad y la eficiencia en la conducción.

La búsqueda de nuevas soluciones que den soporte al incremento de información en el habitáculo del vehículo sin poner en riesgo la seguridad del conductor y pasajeros es fundamental y se convierte en un punto clave para atender a los nuevos servicios incluidos en los ITS de forma genérica y en las redes VANET de forma particular.

Como ya vimos en capítulos anteriores, las nuevas aplicaciones o servicios para proporcionar información sobre el estado de la vía [127], la prevención de accidentes, por ejemplo en intersecciones [128], e incluso las propuestas efectuadas en el capítulo anterior sobre la creación de planes de movilidad inteligente haciendo uso de la comunicación inter-vehicular, hacen que en el interior del vehículo tengamos

información adicional que puede mermar nuestra capacidad de conducir al tener que estar pendientes de ellas.

Este capítulo, trata de enfocar el uso de la información desde el punto de vista del impacto generado por dispositivos de información a bordo del vehículo, así como de la usabilidad de estos aparatos por parte del conductor. Para conseguir tal fin, se realizan diferentes análisis en el que están presentes varios métodos de presentación de información e interacción con aparatos de tipo HUD (Head-Up Display) y HDD (Head-Down Display). Para ello, se llevan a cabo dos estudios, uno enfocado a analizar el impacto que causan los sistemas de tutorización abordo para mejorar la eficiencia en la conducción mediante pantallas convencionales (HDD), presentes hoy día en el mundo automovilístico y el otro relacionado con la incorporación de dispositivos de reciente aparición de tipo HUD, que permiten al usuario ver una pantalla transparente con información relacionada con el entorno de simulación a la vez que la vía por la que circulan. De esta forma, conseguimos una completa evaluación de dispositivos embarcados en el vehículo para la presentación de información relacionada con su propio contexto.

5.1 Dispositivos de Representación de Información

Dentro de la cabina del vehículo, podemos encontrar muchos dispositivos y aplicaciones de información. A las ya existentes, como el ordenador de abordo o el cuadro de mandos, podemos añadir nuevos dispositivos como un navegador GPS, elemento de uso común entre la población actual, o la pantalla de nuestro *smartphone* con alguna aplicación corriendo que nos proporcione información acerca del contexto de conducción en el que nos movemos. La Figura 37 muestra un ejemplo real de dispositivos que presentan información al usuario (enmarcados en rojo) dentro del habitáculo del vehículo. Todas estas aplicaciones de acceso a información tienen un efecto directo sobre el conductor y sobre los ocupantes del vehículo, pudiendo ofrecer nuevos servicios colaborativos o cooperativos a través de las redes vehiculares.



Figura 37. Ejemplo real de dispositivos de información en el interior del vehículo⁸

⁸ <http://tested-cars.blogspot.com>

Atendiendo al tipo de información que podemos encontrar dentro de un vehículo, encontramos no solo la referente al propio estado del vehículo como velocidad, consumos, intermitentes, etc., sino también a las aplicaciones que dan soporte a la conducción. Estos servicios pueden estar orientados a la mejora de la eficiencia en la conducción, como en el caso de los dispositivos de navegación GPS, o estar diseñados para ofrecer al usuario prestaciones adicionales durante el periodo de conducción, por ejemplo, mediante la reproducción de música en diferentes dispositivos o servicios de información visual acerca de las condiciones climatológicas.

Una vez que hemos revisado brevemente el tipo de información y dispositivos que podemos encontrar en el vehículo y las aplicaciones que nos ofrecen, es indispensable realizar una breve revisión de los dispositivos encargados de la representación de información abordo del automóvil. Llegados a este punto, encontramos dos tipos principales de dispositivos para la representación de información: El HDD (Head-Down Display) que hace referencia a las pantallas convencionales (opacas) que se encuentran en el interior del vehículo y que nos hacen desplazar la vista de la carretera para poder atender a la información que aparece en ellas (Figura 37) y el HUD (Head-Up Display) que está compuesto por una pantalla transparente que podremos incorporar en nuestro campo de visión sin que, a priori, entorpezca la conducción y por tanto disminuya la seguridad en la visualización de la información que presenta.

En la Figura 38, extraída del estudio de Mitsubishi Electric [129] en el que se evalúa la usabilidad de dispositivos de tipo HUD, podemos ver la ubicación de ambas pantallas en un entorno simulado. De este modo, para visualizar la pantalla HDD debemos desplazar la vista de la carretera pudiendo provocar situaciones de riesgo en la seguridad en la conducción. En ese sentido, el uso de dispositivos de tipo HUD puede incrementar la percepción de seguridad por parte del conductor al proyectar la información sobre una pantalla transparente o sobre el propio cristal del vehículo.



Figura 38. Simulador de Conducción con dispositivos de tipo HUD y HDD [129]

5.2 Caso de Estudio: Impacto de dispositivos de recomendación abordo para la mejora de la conducción eficiente en ciudad

Este caso de estudio propone un análisis detallado del impacto sobre el comportamiento de los conductores que provocan dos dispositivos de tipo HDD enfocados a la conducción eficiente. Estos aparatos proporcionan al conductor un “*eco-feedback*” para adecuar su comportamiento al volante. Los sistemas embarcados proporcionan información sobre la marcha óptima de conducción y también otros parámetros referentes a la seguridad y confort. En esta ocasión, la evaluación se realiza con una población total de 158 usuarios que usaron de forma regular este tipo de dispositivos durante un periodo de entre 3 y 11 meses. Los resultados muestran que, en general, se producen diferencias significativas en el uso de los sistemas de recomendación en la conducción dependiendo del tipo de ruta, hora del día y otros factores como la edad o el género de los participantes.

5.2.1. Introducción

Una de las aplicaciones que pueden proporcionar información dentro de un vehículo puede estar ligada a la proposición de recomendaciones de conducción para valorar la eficiencia. En este sentido, las técnicas de conducción eficiente son una de las soluciones más usadas para reducir el consumo de carburante y disminuir la emisión de gases contaminantes por parte de los vehículos [130]. Pese a que hay estudios que sugieren sistemas de conducción eficientes en los que la participación del conductor no es necesaria [131], el enfoque propuesto por este estudio es totalmente opuesto, poniendo en alza el papel que desempeña el conductor del vehículo mediante el uso de dispositivos embarcados.

La preferencia de los conductores cuando encontramos los dos tipos de sistemas sin o con participación del conductor, fue analizada por Adell et al. en [132]. En sus evaluaciones hicieron experimentos en el periodo de un mes atendiendo a un total de 20 vehículos que hacían uso de los dos tipos de sistemas y concluyeron que los usuarios preferían los mecanismos que requerían de la participación del conductor.

Ante la gran necesidad de estudiar cómo pueden influir este tipo de dispositivos en los entornos vehiculares reales, muchos estudios realizan sendas evaluaciones para evaluar, no solo las interfaces de visualización de información abordo, sino también posibles alarmas sonoras que producen los dispositivos y las opciones que pueden ofrecer mediante la interacción directa con ellos [133], [134] o [135].

Todo ello, junto con el objetivo de la evaluación de la usabilidad de dispositivos embarcados, nos lleva a pensar que se hace necesario el análisis de uno o varios sistemas de recomendación a la conducción en busca de la eficiencia dentro de un entorno vehicular real. En contraste con algunos trabajos mencionados anteriormente que usan la simulación como base, este estudio se centra en el impacto que provoca el

uso de dos dispositivos diferentes de tipo HDD, valorando también la aceptación que este tipo de tecnología suscita en la población.

5.2.2. Descripción del Sistema de Recomendación

El sistema fue desarrollado considerando al conductor como elemento central del proceso de conducción eficiente. Por esta razón, es importante mantener un nivel de motivación alto para que los usuarios participen activamente en el experimento. La arquitectura propuesta para la creación y propuesta del sistema fue testada previamente en algunos estudios de movilidad urbana [136] en los cuales los participantes conseguían importantes ahorros de combustible (alrededor del 10%) por el seguimiento en las recomendaciones que el sistema les hacía con el objetivo de incrementar la eficiencia en la conducción.

La arquitectura completa del sistema está formada por dos componentes principales: un sistema de abordó y un sistema central. En este caso el sistema de abordó recoge información del vehículo por medio del puerto OBD-II (*On-Board Diagnostic-II*), que permite la obtención de estos datos en tiempo real. Por otro lado, el sistema central realiza el análisis off-line de los datos recogidos. El dispositivo de retroalimentación eficiente (*eco-feedback*) está vinculado a la marcha adecuada de funcionamiento del vehículo a partir de los datos recogidos [137], [138].

Para las indicaciones el tiempo real, el sistema se basa en la marcha óptima de circulación dependiendo de las recomendaciones proporcionadas por un conjunto de reglas en conducción eficiente (*eco-driving*). Ejemplo de ellas son la minimización del periodo de ralentí, la eliminación de frenadas y aceleraciones bruscas o el mantenimiento continuo de la velocidad. Además, se atendía a la información relativa a las aceleraciones o frenadas excesivas o alarmas que determinaban un periodo prolongado de ralentí del vehículo.

Los dispositivos empleados fueron los que se muestran en las Figuras 39 y 40. Podemos observar en la Figura 39, un dispositivo que muestra dos situaciones: una eficiente y la otra ineficiente durante el proceso de conducción. En la pantalla tenemos información sobre la marcha recomendada, la velocidad, las Revoluciones Por Minuto (RPM), el acelerador y una escala de eficiencia de la conducción actual.



Figura 39. Asistente de Conducción #1 - (a) Situación Eficiente, (b) Situación Ineficiente

En el caso de la Figura 40, podemos observar una serie de alarmas que determinan la adecuación de cada uno de los parámetros mostrados mediante indicadores de color. El asistente tiene en cuenta la marcha óptima para la conducción, la velocidad, la aceleración, la frenada y el ralentí. Cada uno de ellos está asociado a un color que puede variar entre verde (conducción eficiente), naranja (conducción media), rojo (conducción ineficiente).

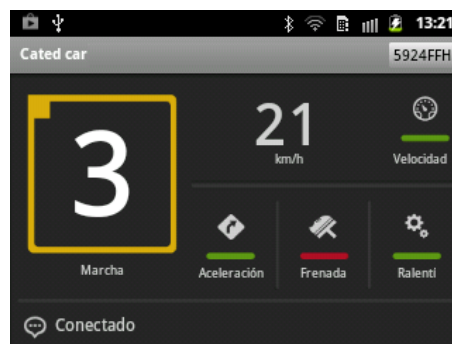


Figura 40. Asistente de Conducción #2

La diferencia principal entre ambos dispositivos está basada en la información que proporciona al conductor. En el primero de ellos, la información se basa en la marcha que el conductor debería llevar. En el caso del segundo, se incluyen aceleraciones, frenadas, tiempo en ralentí y velocidad adecuada.

Aparte de las indicaciones visuales explicadas anteriormente, los asistentes de conducción también incluyen señales acústicas que indican el cambio de marcha. Además, si el conductor permanece mucho tiempo en un estado de conducción ineficiente el sistema le avisa mediante la frase: “Estas conduciendo ineficientemente”.

La principal diferencia entre ambos dispositivos radica en el propósito de los mismos. Mientras que en el primer caso el dispositivo se basa en la marcha óptima para la conducción proporcionando al conductor información sobre su eficiencia en la conducción, en el segundo caso se proporcionan diferentes mensajes para los parámetros registrados a los que el conductor deberá prestar atención.

5.2.3. Evaluación del Sistema de Recomendación

Para la realización de la evaluación de los sistemas, se instalaron los dispositivos descritos en la sección previa (5.2.2) en vehículos privados, obteniendo unos resultados satisfactorios en el ahorro de combustible [137]. El análisis propuesto se basa en los datos recogidos por los sistemas planteados durante el proceso de conducción con el objetivo de localizar puntos críticos en los que el sistema de recomendación tiene peor efecto, intentando aclarar el impacto de dichos sistemas en función de diferentes grupos de población, así como la evolución del comportamiento de los usuarios en relación con el uso de la información ofrecida por los dispositivos.

5.2.3.1. Diseño de los Experimentos

Los análisis de datos fueron realizados a partir de la información recogida a través de varias implantaciones reales de dispositivos embarcados en dos grandes proyectos: Ecomilla⁹ y LabCityCar¹⁰. En estos trabajos, los participantes instalaban los dispositivos de recomendación en sus vehículos particulares para hacer uso de ellos.

A partir de los diferentes dispositivos (explicados en la sección 5.2.2), se propusieron 2 escenarios diferentes. El Escenario #1, compuesto por vehículos privados que hacían uso del sistema de recomendación basado en la marcha engranada y el Escenario #2 en el que también se encontraban vehículos particulares, pero en este caso atendiendo al dispositivo de recomendación que daba información de un mayor número de parámetros ligados a la conducción eficiente como los eventos de aceleraciones o frenadas bruscas.

En el caso del Escenario #1, los usuarios que participaron en la prueba atendieron al primer asistente de conducción (Figura 39) durante un tiempo total de 3 meses. Los participantes del Escenario #2 hacían uso del segundo tipo de dispositivo (Figura 40), y prolongaron su utilización a lo largo de 11 meses. Los participantes en ambos casos eran, por norma general, ciudadanos de la ciudad de Gijón (España).

Para los dos escenarios, los experimentos se dividían en dos fases. Durante la primera fase, los conductores eran monitoreados sin que el sistema de abordó hiciera ninguna recomendación. De esta forma, podíamos trazar una línea base de conducción que determinaría la mejora/empeoramiento del conductor. En la segunda fase del experimento, el sistema se ponía en funcionamiento para otorgar al conductor las recomendaciones sobre conducción eficiente oportunas.

La Tabla 25 recoge las principales características de cada uno de los escenarios propuestos atendiendo al asistente de conducción utilizado, el periodo de la experimentación, las rutas efectuadas, la distancia total en kilómetros y las horas totales del estudio.

Escenario	Asistente de Conducción	Periodo	Rutas Totales	Km Totales	Horas Totales
#1	#1 (Figura 39)	3 meses	3947	49925,4	975,74
#2	#2 (Figura 40)	11 meses	7758	80599,6	1723,8

Tabla 25. Descripción de los escenarios

Para evaluar el impacto que este tipo de dispositivos provocan en los usuarios, el análisis de los resultados se realizó basándonos en cuándo la marcha engranada en el vehículo no es la recomendada por el sistema, en el Escenario #1 y teniendo en cuenta también las alarmas sobre tiempos de ralentí, aceleraciones y frenadas en el caso del Escenario #2.

⁹ <http://www.ecomilla.com/>

¹⁰ <http://www.labcitycar.info/>

Para atender también a la capacidad de los conductores a la hora de seguir las recomendaciones que lanzan los sistemas en función del momento en el que realizan la conducción y el tiempo destinado a tal fin, se evaluaron los datos a lo largo de la duración de los experimentos atendiendo a diferentes características de la ruta como la duración total o la hora del día. Por último, se tuvo en cuenta el comportamiento del conductor en función del género y la edad para el caso del Escenario #1.

5.2.3.2. Población del Estudio

En el estudio participaron un total de 158 usuarios, de los cuales 81 participaron en el primer escenario (Escenario #1) se distribuyen en 29 mujeres y 52 hombres. Las edades de los usuarios estaban comprendidas en entre los 23 y 50 años, con una media de edad de 35,06 años. En el caso del Escenario #2 participaron un total de 77 usuarios, de los cuales se desconoce su edad y género por motivos relacionados con la privacidad de los participantes.

El total de los usuarios que participaron en las pruebas desarrolladas en este estudio, dio lugar a un conjunto de población total representativa por su cantidad y resultó ser una de las más grandes recogidas en ese tipo de investigaciones desarrolladas en entornos reales.

5.2.4. Análisis de Resultados

El análisis de los resultados obtenidos se realiza en función a los escenarios descritos anteriormente (Escenario #1 y Escenario #2) atendiendo a diferentes análisis basados en el perfil del usuario, en las características de la ruta y en el seguimiento de las recomendaciones dependiendo del tipo de recomendación

5.2.4.1. Escenario #1

Como paso preliminar a la hora de realizar los análisis, se descartaron los periodos de tiempo correspondientes al proceso de adaptación de los usuarios en el cual los conductores capturaban señales de advertencia y realizaban el cambio de marcha adecuado.

Según nuestro estudio, el tiempo medio de respuesta de los conductores para realizar un cambio de marcha después de una nueva recomendación es de aproximadamente 4 segundos. A partir de este valor, evaluaremos los periodos de más de 4 segundos cuando la marcha engranada no corresponda con la marcha recomendada.

En base a la información recopilada, podemos evaluar la evolución de los conductores entre el periodo de la línea base y el periodo de asistencia. Los resultados muestran que el 83% de los usuarios mejoran el uso de los cambios de marchas durante la conducción, lo que indica una alta aceptación del sistema de recomendación por todos los participantes. Además, el porcentaje medio de mejora entre el periodo de referencia (línea base) y el periodo de asistencia (funcionamiento del sistema de recomendación) es del 22,5%.

Si analizamos en detalle el periodo de asistencia, se localiza que un 48% de los usuarios muestran una evolución positiva, en el seguimiento de las recomendaciones desde el primer día de uso hasta el último, supuso una mejoría media de un 8,22% en la adquisición de conocimientos acerca de un cambio de marcha eficiente. Por otro lado, los usuarios que utilizan el sistema de recomendación de manera intensiva durante el experimento obtienen un porcentaje de mejora del 14,42% sobre los usuarios que utilizan el dispositivo durante menos tiempo, lo que implica un número menor de rutas efectuadas.

Las siguientes secciones se centran en el análisis detallado del impacto que el sistema de recomendación a la conducción tiene entre los diferentes usuarios y rutas seguidas por los mismos.

Análisis Basado en el Perfil de Usuario

Para realizar el análisis basado en el perfil de usuario atendemos a dos posibles categorías dividiendo los grupos por edad y género.

Cuando analizamos el tiempo medio de respuesta ante la aparición de una recomendación del sistema atendiendo al género de los participantes, observamos que los hombres reaccionan de forma más rápida ante la recomendación del cambio de marcha, obteniendo un tiempo medio de 11,59 segundos, mientras que las mujeres reaccionan en un tiempo medio de 14,02 segundos. Las diferencias encontradas entre ambos grupos fueron significativas, teniendo un $p\text{-value} < 0,05$ cuando se analizaban siguiendo el test de *Kruskal-Wallis*. Si realizamos el análisis en detalle comparando el primer y el último día de uso, podemos ver cómo los hombres pasan de un tiempo medio de respuesta de 10,70 segundos en el primer día a un tiempo de 9,13 segundos el último, reduciendo en 1,57 segundos el tiempo que tardan en atender a las recomendaciones. En el caso de las mujeres, el tiempo incrementa en 0,17 segundos, teniendo en el primer día un tiempo medio de reacción de 13,59 segundos y aumentando este tiempo hasta los 13,76 segundos obtenidos el último día de medición de datos.

Para analizar a la población en función de la edad de los usuarios se prepararon 3 grupos: 20-30 años, 31-40 años y 41-50 años. Atendiendo a la clasificación de usuarios propuesta, como vemos en la Tabla 26 los resultados obtenidos en el tiempo de reacción medio entre el primer y el último día. En este caso, la mayor reducción de tiempo de repuesta en los usuarios se da en los de mayor edad pese a ser los que tenían el tiempo más alto inicialmente.

Grupo de Usuarios	Primer Día (segundos)	Ultimo Día (segundos)
20-30 - jóvenes	8,22	9,33
31-40 - mediana edad	12,6	11,97
41-50 - mayores	13,05	9,24

Tabla 26. Media de tiempo de respuesta para seguir las recomendaciones entre el primer y el último día en función de grupos de usuarios según edad

Para aclarar los resultados obtenidos, en la Figura 41 se pueden observar los valores en función del tiempo medio de reacción para los grupos mencionados anteriormente. De acuerdo tanto a la Figura 41, como a la Tabla 26, como los usuarios de más de 41 años tienen un tiempo de respuesta menor ante las recomendaciones del sistema para el cambio de marcha, por lo que podemos pensar que reaccionan de forma más inmediata a las advertencias del mismo, reforzando la afirmación realizada por [139] en la que se asegura que las personas mayores tienden a usar más los sistemas de recomendación que dan soporte a la conducción.

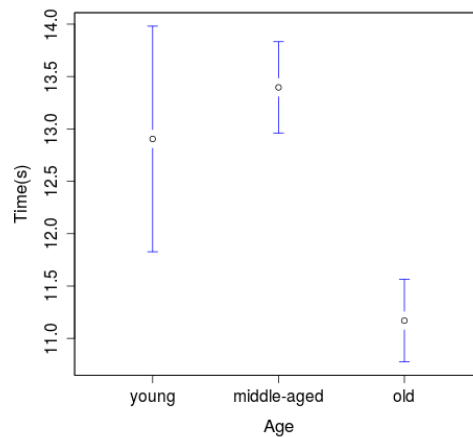


Figura 41. Tiempo medio de respuesta para grupos de usuarios según la edad (Escenario #1)

Aplicando el test de Tukey, podemos confirmar que existen diferencias significativas entre los grupos de usuarios dependiendo de la edad en las siguientes relaciones: jóvenes-mayores, mediana edad-mayores.

Teniendo en cuenta las dos categorías planteadas en el estudio (edad y género) encontramos diferencias significativas entre hombres y mujeres de mediana edad, hombres y mujeres mayores y hombres jóvenes y hombres de mediana edad, no encontrando diferencias significativas para el resto de los usuarios.

Podemos concluir que la tasa de seguimiento del sistema de recomendación está relacionada directamente con la edad y el género de los participantes, siendo las poblaciones que hacen mejor uso de este tipo de sistemas las mujeres mayores, seguidas por los hombres en el mismo rango de edad.

Análisis Basado en las Características de las Rutas

Cuando realizamos el análisis basado en las características de las rutas, atendimos a 3 factores clave, rutas urbanas/interurbanas, hora del día y duración media de la ruta seguida por los conductores.

En líneas generales, el sistema de recomendación funciona mejor en rutas urbanas, teniendo un tiempo medio para el seguimiento de las recomendaciones de 11,98 segundos, en contraste con los 13,53 segundos localizados en rutas interurbanas. Para

este caso, el test de *Kruskal-Wallis* confirmó la existencia de diferencias significativas. Si atendemos a la diferenciación entre el primer y el último día para el caso de rutas urbanas e interurbanas encontramos los resultados que se muestran en la Tabla 27.

Tipo de Ruta	Primer Día (segundos)	Ultimo Día (segundos)
Urbana	14,75	9,91
Interurbana	13,46	11,09

Tabla 27. Media de tipo empleado en seguir las recomendaciones entre el primer y el último día

Como podemos observar, en el caso de las rutas urbanas, la disminución del tiempo es mucho mayor que en el caso de rutas interurbanas, reduciendo en 4,84 segundos el tiempo de reacción ante una recomendación.

La duración de la ruta, es otro de los factores que pueden afectar al comportamiento de los usuarios por lo que, se hace necesario valorar la influencia que tiene sobre ellos. En general, las rutas más largas obtienen valores medios más altos que las rutas más cortas. En este caso, las rutas menores a 25 minutos recogen un número mayor de incidentes en la recomendación de cambio de marcha. La Figura 42 muestra una gráfica con los intervalos considerados y el tiempo de respuesta medio en función de la duración de la ruta.

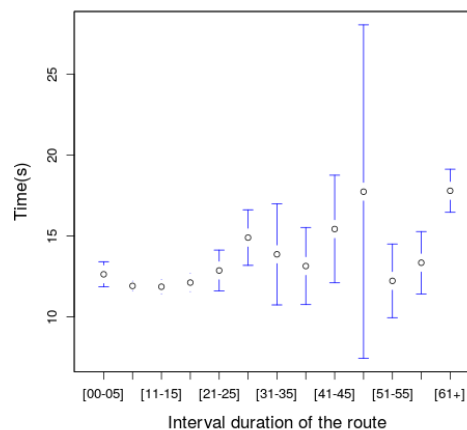


Figura 42. Tiempo medio en seguir las recomendaciones en función del intervalo de duración de las rutas (Escenario #1)

La mejora en el uso del sistema basándonos en la duración de la ruta (intervalos) indica que los trayectos con una duración en el intervalo de [31-35] minutos alcanzan el mayor valor de mejora entre el primer día y el último. Por el contrario, las rutas de más de 40 minutos evolucionan, en líneas generales, de forma negativa.

Por otro lado, la Figura 43 muestra las horas en las que los conductores prestan más atención al sistema embarcado. Podemos observar cómo en algunas horas del día los conductores ignoran de forma más acentuada las recomendaciones, principalmente a las 10 y entre las 15 y las 17 horas. Además, podemos observar el caso especial de las 22

horas en el que un análisis detallado revela que hay un usuario que no siguió las recomendaciones.

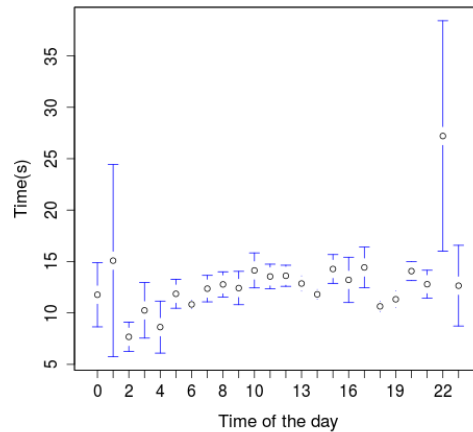


Figura 43. Tiempo medio en seguir las recomendaciones en función de la hora del día (Escenario #1)

Análisis Basado en el Seguimiento de Recomendaciones

La recomendación efectuada por el primer asistente, muestra la marcha a la que el conductor debe conducir para minimizar el consumo de combustible. Por esta razón, debemos evaluar aquellas recomendaciones de cambio de marcha que el usuario es más reacio a seguir. La Figura 44 muestra los tiempos de respuesta medios para cada una de las recomendaciones de cambio de marcha efectuadas por el sistema.

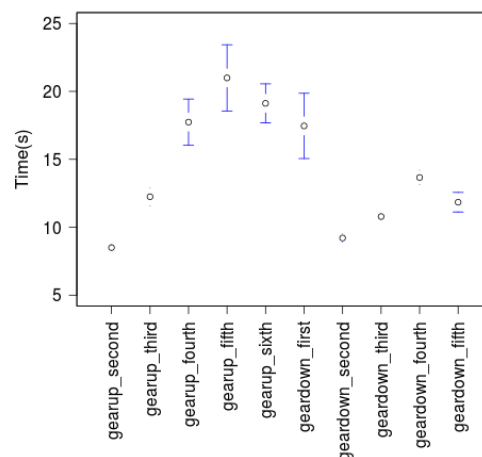


Figura 44. Tiempo medio en seguir las recomendaciones en función de la recomendación de cambio de marcha efectuada por el sistema (Escenario #1)

Como podemos observar, la recomendación del cambio de marcha de 4ª a 5ª (y también de 5ª a 6ª cuando el vehículo dispone de esta opción) tiene el máximo tiempo de reacción por parte de los conductores pudiendo indicar que los usuarios no hacen caso a la información mostrada en la pantalla durante periodos largos. La razón de este tiempo podemos encontrarla en el tipo de normas de conducción eficientes utilizadas para

desarrollar e implementar el sistema de recomendación. Estas indicaciones, implican que la velocidad a la que se debe cambiar la marcha sea más baja que la velocidad a la que los usuarios están acostumbrados a hacerlo.

5.2.4.2. Escenario #2

En el Escenario #2 no disponíamos de información relativa al perfil de los usuarios en cuanto a la edad y al género. Por ello, se decidió analizar los datos en función de las recomendaciones efectuadas para cada uno de los parámetros que mostraba el segundo dispositivo de tipo HDD embarcado (Figura 40), de las características de las rutas seguidas por los conductores y del seguimiento de las recomendaciones otorgadas por el sistema de recomendación.

Análisis Basado en el Sistema de Recomendación de Marcha, Aceleraciones y Frenadas

En el segundo escenario, el sistema de asistencia proporcionaba, además de la marcha de conducción recomendada, diferentes niveles de alarmas relacionados con aceleraciones y eventos de frenado. En este caso, los datos resumidos se expresan en términos de alarmas por Kilómetro recorrido (Alarmas/Km). Aun así, hemos analizado también el tiempo medio que los conductores empleaban el seguir las recomendaciones como en el caso del Escenario #1.

Como en el primer escenario, los usuarios realizaban una conducción libre en el que el sistema no otorgaba recomendación alguna durante el periodo de conducción, de esta manera, recogimos los datos obtenidos por el usuario en este contexto para poder trazar y proponer una línea base de comparación. De esta forma, podríamos confirmar con seguridad la mejora que supone incluir este tipo de pantallas dentro del habitáculo del vehículo. La Tabla 28 muestra los principales datos obtenidos atendiendo al periodo sin y con asistencia. La denominación de las alarmas de Aceleración y Frenada N1 y N2, se refieren al tipo de aviso en función del color que muestra el asistente en la pantalla (naranja o rojo).

Periodo	Alarmas de Marcha	Alarmas de Aceleración N1	Alarmas de Aceleración N2	Alarmas de Frenada N1	Alarmas de Frenada N2
Línea Base	1,16	1,29	0,62	0,72	0,44
Periodo de Asistencia	1,62	1,36	0,44	0,73	0,35

Tabla 28. Evolución de las alarmas entre la línea base y el periodo con asistencia

A partir de los resultados iniciales encontrados podemos concluir que incrementar la carga de trabajo mental de los conductores al incluir un mayor número de alarmas, hace que la mejora localizada en este experimento no sea tan notable como en el caso del Escenario #1.

Además de los resultados obtenidos, y centrándonos en el modo de asistencia, podemos observar como toda mejora relacionada con la duración media del tiempo necesario para seguir una recomendación de cambio de marcha es de aproximadamente del 4,98% entre el primer y el último día de uso. Si lo comparamos con el Escenario #1, vemos como este valor difiere mucho del ofrecido por el primer asistente (8%).

Una de las diferencias encontradas más destacadas respecto al Escenario #1, es que los usuarios que hacen uso de este nuevo asistente durante periodos de tiempo prolongados, logran una mejora media en el uso de recomendaciones de alrededor del 9,22% para usuarios esporádicos u ocasionales. Este valor de mejora está de nuevo por debajo del valor obtenido en el Escenario #1.

Análisis Basado en las Características de las Rutas

En este segundo escenario también se propuso la realización del análisis en función de las características de las rutas, realizando una clasificación de diferentes trayectos dependiendo de su duración. Haciendo referencia, de nuevo, al número promedio de alarmas/km, los resultados muestran que los caminos más cortos tienen, en general, un mayor número de alarmas que las rutas largas. Sin embargo, en relación con la duración del tiempo para evitar la aparición de alarmas de cambio de marcha, las rutas largas presentan peores resultados como ocurría en el primer escenario. La Figura 45 muestra lo explicado anteriormente.

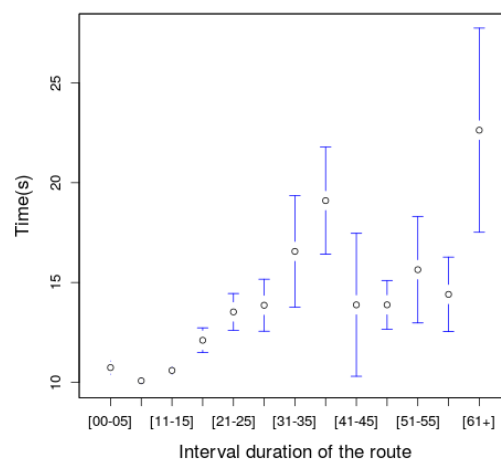


Figura 45. Tiempo medio en seguir las recomendaciones en función del intervalo de duración de las rutas (Escenario #2)

A pesar de que el intervalo [36-40] muestra unas duraciones elevadas en el tiempo empleado para seguir la recomendación del asistente, el análisis también revela que este intervalo presenta la mayor mejora durante los experimentos realizados.

Si enfocamos nuestro análisis en relación a la hora del día, encontramos que este parámetro influye en la atención de los usuarios, siendo menor a la hora del día en el que hay una mayor cantidad de vehículos en la carretera y por tanto un mayor volumen

de tráfico. La Figura 46 muestra los tiempos medios en seguir la recomendación por cada hora del día.

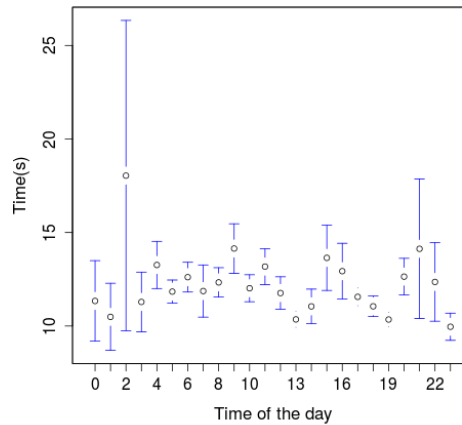


Figura 46. Tiempo medio en seguir las recomendaciones en función de la hora del día (Escenario #2)

Análisis Basado en el Seguimiento de Recomendaciones

En este análisis analizamos el único elemento común que tienen los dos sistemas de asistencia: la recomendación del cambio de marcha, atendiendo al tiempo medio de respuesta de los conductores desde que ven la indicación en la pantalla hasta que reaccionan. Como en el primer escenario, las recomendaciones en marchas altas (de 4^a a 5^a y de 5^a a 6^a), generaron los mayores tiempos de reacción para seguir la recomendación (Figura 47).

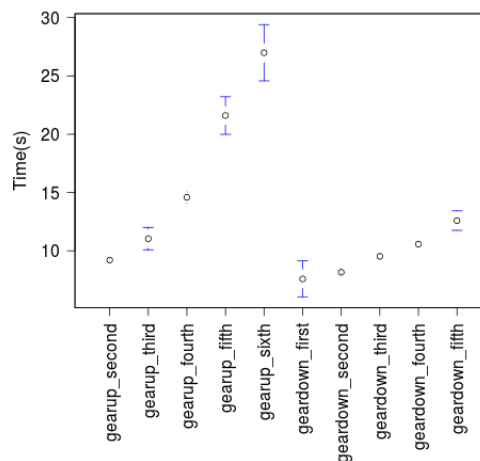


Figura 47. Tiempo medio en seguir las recomendaciones en función de la recomendación de cambio de marcha efectuada por el sistema (Escenario #2)

Además, algunos valores medios de tiempo necesario para realizar la acción recomendada son, en general, mayores que en el primer escenario, lo que confirma nuestra hipótesis anterior: incrementar la información en este tipo de sistemas de

representación de información puede conducir a un aumento de la carga de trabajo mental y el sistema podría perder efectividad.

5.2.5. Conclusiones

Mediante este estudio hemos podido analizar el impacto que tiene sobre conductores particulares, el uso de dos asistentes para la conducción eficiente. Los dos dispositivos se incorporaban en el vehículo mediante una pantalla de tipo HDD a la que el conductor debía atender con el objetivo de mejorar su eficiencia en la conducción.

En líneas generales, los usuarios adoptan esta tecnología de forma positiva, reduciendo el tiempo de aparición de alarmas desde el primer día de uso hasta el último. Además, se llevaron a cabo, algunos análisis atendiendo también al género, edad o tipo de ruta que los conductores hacían.

Los resultados globales cuando hacemos la distinción de usuarios dependiendo del género, muestran que el grupo femenino hace peor uso del sistema de recomendación cuando lo comparamos con el masculino. Cuando analizamos los datos dividiendo a la población por edad, podemos concluir que el grupo de los usuarios mayores de 41 años sigue las recomendaciones a mayor velocidad que los otros grupos. Además de esto, los resultados respecto a las rutas que realizan los conductores muestran que los trayectos de duración extrema (camino muy cortos o muy largos) conducen a un peor comportamiento atendiendo a los sistemas de recomendación. Por otro lado, los momentos del día en el que se concentran la mayoría de las ineficiencias en la conducción son las 15 horas y, en menor medida, de 11 a 12 y a las 22 horas, aunque es a las 10 horas cuando se encuentra que los usuarios atienden en menor grado al sistema de recomendación. Esto puede ser una indicación clara de la influencia de las condiciones del tráfico en el uso de los asistentes de conducción.

Al realizar el análisis de datos sobre los dos tipos de rutas principales (urbanas e interurbanas), podemos concluir que hay una mayor aceptación de la recomendación en trayectos urbanos, obteniendo un tiempo promedio para seguir la recomendación inferior a las rutas interurbanas. Además, llegamos a la conclusión de que la adición de un número excesivo de mensajes de advertencia resulta contraproducente a la hora de prestar atención a las recomendaciones que realiza el sistema.

5.3 Caso de Estudio: Aplicación de dispositivos de representación de información de tipo HUD en entornos vehiculares reales

Una vez realizado el estudio sobre el impacto que provoca la incorporación de pantallas de tipo HDD en el contexto vehicular, esta sección desarrolla un caso de estudio completo sobre la incorporación, uso e interacción de dispositivos de tipo HUD en entornos vehiculares reales. Al encontrarnos en un entorno en el que la cantidad de información recibida de otros vehículos (dentro de una red vehicular) o proporcionada

por el propio automóvil puede ser perjudicial para la seguridad y confort al volante, fijamos un objetivo claro: Valorar los métodos de visualización de información abordo de los vehículos y analizar la usabilidad e interacción con este tipo de dispositivos de reciente aparición (HUDs). Para ello se expone una breve introducción sobre esta clase de estudios y dispositivos, el diseño completo de los experimentos realizados, así como los dispositivos empleados, el análisis de los resultados obtenidos y las principales conclusiones obtenidas.

5.3.1. Introducción

En la actualidad, el gran número de vehículos en carretera [140] y la gran evolución de las tecnologías de asistencia y equipamiento usado en los vehículos, incrementan los niveles de distracción al volante y, por tanto, reducen los de seguridad al tener que estar pendientes de la información que se muestra. Debido a ello, es necesario el desarrollo de nuevos sistemas de visualización instalados en los vehículos que garanticen la seguridad de los usuarios en los procesos de conducción. En este contexto, los dispositivos Head-Up Display (HUDs) pueden ser considerados como una solución adecuada para la visualización de información, de hecho, algunas marcas automovilísticas están empezando a implantar este tipo de aparatos en sus vehículos. De acuerdo con algunos estudios, los HUDs permiten la presentación de información y datos en el parabrisas o sobre una pantalla transparente ayudando a los usuarios a conducir con una mayor sensación de seguridad [141].

Muchos de los estudios relacionados con este tipo de sistemas realizan la experimentación sobre entornos simulados, obteniendo una buena aproximación al objetivo inicial, pero nunca llegando a contrastar de forma empírica los resultados obtenidos [129], [142] o [143].

Pese a que algunas investigaciones presentan información sobre la velocidad del vehículo en un dispositivo HUD [144], o la implementación de un sistema de aviso de accidentes [145], usan dispositivos HUDs en entornos reales, la falta de un número mayor de trabajos que avalen la solución propuesta (sobre todo en este tipo de entornos reales) se hace patente. Por ese motivo, se decidió llevar a cabo un estudio sobre la incorporación de estos dispositivos en un entorno real. En este capítulo se presenta una amplia evaluación sobre la incorporación de dispositivos HUD en entornos vehiculares reales y el análisis de la interacción, mediante reconocimiento de voz, de los usuarios con este tipo de aparatos de representación de información. Para llevar a cabo la experimentación, se definieron dos fases destinadas, en primer lugar, a evaluar la incorporación de este tipo de dispositivos en un entorno vehicular (Fase #1) y por otro lado al análisis de la interacción mediante comandos de voz haciendo uso de esta de tecnología (Fase #2). Los resultados obtenidos muestran la viabilidad de la propuesta provocando una aceptación muy alta por parte de los usuarios al aumentar la sensación de seguridad que experimentan al volante.

Los resultados de nuestro estudio muestran que los usuarios prefieren los dispositivos de tipo HUD, a los HDD, teniendo una clara tendencia a la interacción con ellos

mediante el uso de métodos restrictivos dentro del vehículo, como el reconocimiento de voz, a través del uso de métodos de interacción por voz mediante comandos predefinidos.

5.3.2. Diseño del Sistema de Representación de Información

Para llevar a cabo las evaluaciones propuestas en un entorno real necesitábamos, en primer lugar, definir el conjunto de pruebas que se iban a realizar y por otro el montaje completo del sistema en un entorno vehicular real. En este caso, el diseño general del sistema de representación se muestra en la Figura 48. Como podemos ver, el despliegue está compuesto por un teléfono inteligente (smartphone) y el dispositivo HUD. La metodología consiste en que el dispositivo móvil envíe la visualización de su propia pantalla vía Wi-Fi al dispositivo HUD para su posterior representación. De esta forma no tenemos cableado en el interior del vehículo.

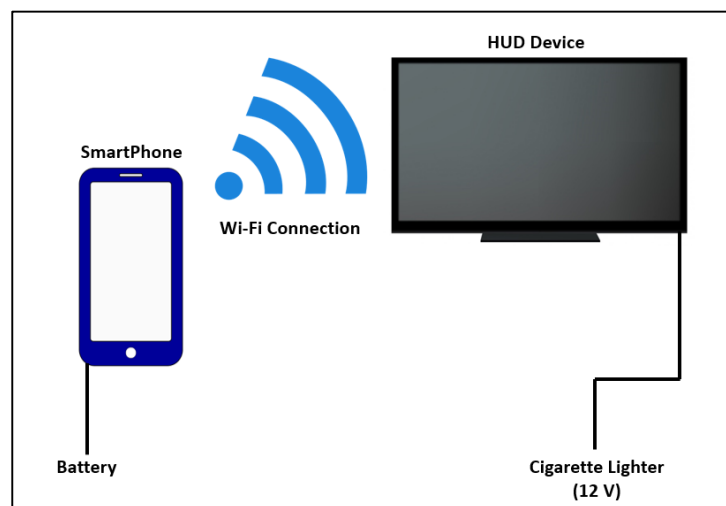


Figura 48. Diseño General del Sistema

La alimentación del dispositivo HUD se realiza a través de la conexión de 12 V del vehículo disponiendo, a su vez, de un puerto auxiliar de tipo USB en el conector para, dado el caso, poder alimentar también al dispositivo móvil.

5.3.2.1. Dispositivo HUD - recPOP

RecPOP es un dispositivo de tipo HUD perteneciente a la marca RoadEyes¹¹ que nos permite evaluar, de forma experimental la incorporación e interacción de este tipo de sistemas dentro de un entorno vehicular real.

El dispositivo se ajusta a la forma del salpicadero del vehículo pudiendo ser instalado según la preferencia del usuario que lo usa, atendiendo siempre a la visibilidad y seguridad en el proceso de conducción. Hay que tener en cuenta que su cometido es el de ver la vía y la información que muestra de forma simultánea, por lo que

¹¹ <http://www.road-eyes.com/>

necesitaremos colocarlo de forma adecuada. La Figura 49 muestra dos posibles ubicaciones del mismo que permiten visualizar tanto la calzada como la información que presenta. En la primera de ellas (izquierda), encontramos el dispositivo ubicado frente al conductor, de este modo se mantiene la vista al frente pudiendo observar tanto los datos que el dispositivo muestra como el entorno por el que se circula. En la segunda opción (derecha), encontramos el dispositivo recPOP colocado justo en la parte central del vehículo (desviado a la derecha del conductor). En esta ocasión, podemos visualizar también la información que muestra el dispositivo y el entorno de conducción desviando ligeramente la vista hacia la derecha, manteniendo de nuevo la atención sobre la vía.



Figura 49. Dispositivo recPOP embarcado en el vehículo

Las principales características del dispositivo se encuentran reflejadas en la Tabla 29.

Característica	Valores
Potencia de Entrada	DC 9V ~ 16V (3 A)
Entrada/Salida	USB, Salida de Audio, Entrada HDMI y CVBS
Pantalla	Alta luminosidad con 6.2" PANEL
Imagen	6.2" full color (Virtual image) Resolución: 8010 x 480 Brillo: 4,500 ~ 5,000 cd/m (max)
Altavoz	1W x 1 & 0,8W x 1
Ajuste de Brillo	Ajuste automático de luz ambiente de 4 niveles Ajuste manual de luz de 16 niveles
Tamaño Virtual de Imagen	Tamaño de 7" (para película en parabrisas) Tamaño de 6.2" (Pantalla Dispositivo recPOP) Resolución: 800 x 480
Rango de Temperatura de Funcionamiento	Funcionamiento: -10°C a +60° C Almacenamiento: -20°C a +70° C
Dimensiones	18,0 cm x 13,6 cm x 2,0 cm

Tabla 29. Especificaciones Técnicas del Dispositivo recPOP

La selección de este dispositivo frente a otras opciones comerciales se basa en la sencillez de incorporación de aplicaciones propias o desarrolladas por un tercero,

usando el sistema operativo Android. Al tener la representación limitada a la replicación de la pantalla del dispositivo móvil para su visualización, cualquier aplicación del dispositivo podrá ser representada en el dispositivo HUD pudiendo diseñar, desde el principio, las necesidades de nuestra aplicación.

5.3.2.2. Teléfono Móvil y Software Empleado

Para ejecutar las aplicaciones hemos usado un teléfono inteligente (smartphone) de la marca BQ, concretamente el modelo E4.5, considerado por el grupo de investigación como un dispositivo de gama media apropiado para la realización de los experimentos. Las principales características del mismo están recogidas en la Tabla 30.

Característica	Descripción
Dimensiones	67 x 137 x 9 mm
Peso	123 g
SoC	Media Tek MT6582
CPU	ARM Cortex-A7, 1300 MHz with 4 Cores
GPU	ARM Mail-400 MP2, 500 MHz with 2 Cores
RAM	1 GB, 533 MHz
Almacenamiento	8 GB
Pantalla	4.5 in, IPS, 540 x 960 pixels, 24 bit
Batería	2150 mAh, Li-Polymer
Sistema Operativo	Android 4.4.2 KitKat
Wi-Fi	B, g, n Wi-Fi Hotspot
USB	2.0, Micro USB
Posicionamiento	GPS, A-GPS

Tabla 30. Características Teléfono Móvil Seleccionado

Con el objetivo de la realización de los ensayos, hemos usado varias aplicaciones disponibles para el sistema operativo Android. En nuestro caso, la Tabla 31, muestra el total de las aplicaciones utilizadas y una breve descripción de las mismas, así como a la fase de la experimentación a la que corresponde y que será desarrollada en mayor profundidad en la sección 5.3.3.

Aplicación/Software	Descripción	Fase
CATED	Asistente a la conducción para la mejora de la eficiencia en la conducción desarrollado por la empresa ADN Mobile Solutions	#1
Maps	Aplicación para Navegación GPS desarrollada por Google Inc.	#1
HUDWAY	Aplicación para Navegación GPS diseñada específicamente para entornos HUD	#1
Google Now Launcher	Lanzador para la interacción HCI basada en comandos de voz	#2
Voice Access	Software para la interacción HCI basada en indicadores numéricos y comandos de voz	#2

Tabla 31. Aplicaciones, descripción y fase del experimento

5.3.3. Diseño de los Experimentos

La investigación, fue dividida en dos fases diferentes. La primera de ellas encargada de la evaluación del uso de aplicaciones de asistencia a la conducción y la comparativa de pantallas transparentes (incorporadas en los HUDs) y pantallas convencionales (HDD) haciendo uso de aplicaciones como CATED [137], diseñada para la mejora de la eficiencia en la conducción y otras aplicaciones de navegación como *Google Maps* y *HUDWAY* (destinada a este tipo de entornos). En esta primera fase, también se estudió la preferencia de los usuarios por la forma en la que prefieren interactuar con este tipo de dispositivos. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta primera etapa de la investigación, se decidió prolongar el estudio realizando una segunda fase encargada de la evaluación de la interacción entre el conductor y el dispositivo HUD mediante técnicas de reconocimiento de voz (método de interacción elegido por los usuarios en la primera fase). Para este propósito, comparamos dos métodos de interacción por voz: comandos de voz predefinidos mediante *Google Now Launcher*¹² y un sistema de mapeo de números en pantalla utilizado por *Voice Access*¹³.

Un total de 50 conductores no profesionales participaron en el estudio, siendo divididos en dos grupos para cada una de las fases. 20 constituyeron la primera fase del experimento (incorporación de dispositivos HUD en entornos vehiculares reales) y 30 conformaron la segunda fase (evaluación de la interacción por voz).

A continuación, se detallan en profundidad las dos fases de la experimentación completa desarrollando todas las pruebas realizadas y los métodos empleados para su validación y estudio.

5.3.3.1. Escenario de Pruebas y Población del Estudio

Los experimentos se llevaron a cabo en un entorno real de conducción donde se garantizaba la seguridad de los conductores realizando las pruebas en un área controlada con tráfico fluido y límites de seguridad bajos. Usamos una zona del Campus de Gijón de la Universidad de Oviedo en un día laboral y en horario matutino. La Figura 50, muestra el área aproximada en la que se llevó a cabo la experimentación, así como la ruta seguida por los conductores (línea azul).

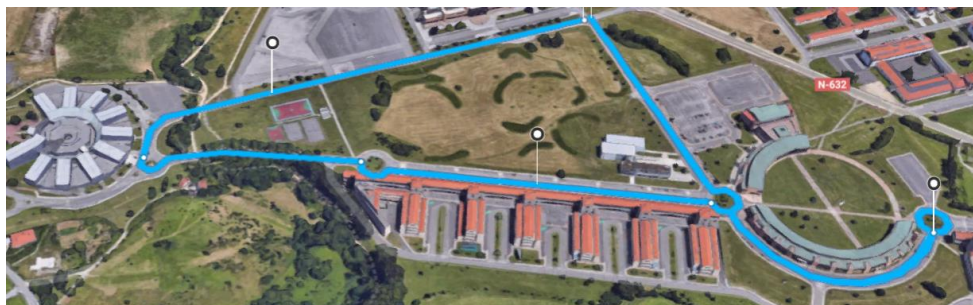


Figura 50. Escenario Real usado en los Experimentos

¹² <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.launcher>

¹³ <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.apps.accessibility.voiceaccess>

En este contexto, cada participante debía realizar la conducción del vehículo un tiempo aproximado de 20 minutos en una sesión guiada por el investigador que lo acompañaba usando diferentes aplicaciones. Los participantes debían seguir las instrucciones que le ofrecía el acompañante (investigador), con el fin de ser capaces de completar los experimentos y proveer, a posteriori, la opinión al respecto.

Para recibir las percepciones y opiniones de los usuarios y de esta forma poder realizar un análisis de resultados, los usuarios tenían que completar 2 cuestionarios (uno por cada fase). En ellos aparecía información referente al perfil del usuario, así como cuestiones sobre la incorporación, uso, interacción y aceptación de esta tecnología usando una encuesta de tipo Escala de Likert (con valores de 1 a 5). En algunos aspectos, también se permitía al usuario escribir sus impresiones subjetivas atendiendo a una pregunta de respuesta corta.

Un total de 50 conductores, no profesionales, participaron en las pruebas. Estos usuarios fueron divididos en 2 grupos con el objetivo de completar las dos fases del experimento. Durante la primera fase participaron un total de 20 usuarios realizando una conducción con dispositivos de tipo HUD y HDD y con asistentes a la conducción. Los resultados obtenidos durante esta etapa, fueron utilizados para la realización de la segunda, donde 30 conductores fueron incluidos para evaluar el uso del reconocimiento de voz como método de interacción.

En referencia a la información general de los usuarios, un total de 36 hombres y 14 mujeres participaron en los experimentos (72% y 28% respectivamente). La edad de la población iba desde los 19 años hasta los 67, teniendo una media de edad de 36,20 años con una desviación estándar de 13,05. Entre los datos personales recogidos también teníamos en cuenta la experiencia en la conducción de los usuarios, obteniendo una media de 14,04 años de experiencia con una desviación de 11,43. También teníamos en cuenta el uso previo de pantallas de información dentro del vehículo de forma regular, encontrando que el 58% de los usuarios utilizan de manera cotidiana este tipo de dispositivos, mientras que el 42% de usuarios no contaba con experiencia previa. La Tabla 32, muestra los detalles de la población divididos en las dos fases de los experimentos realizados.

Fase #1: Incorporación de Dispositivos HUD en Entornos Vehiculares Reales	
Número de Usuarios	20
Edad Min - Edad Max	21 - 63
Media de Edad	39,75
Desviación Estándar	13,43
Género	5 mujeres y 15 hombres
Fase #2: Interacción con Dispositivos HUD usando Reconocimiento de Voz	
Número de Usuarios	30
Edad Min - Edad Max	19 - 67
Media de Edad	35,28
Desviación Estándar	12,91
Género	9 mujeres y 21 hombres

Tabla 32. Características de los Participantes en las Fases del Experimento

5.3.3.2. Fase 1: Incorporación de Dispositivos HUD en Entornos Vehiculares Reales

En la fase 1, un total de 20 conductores no profesionales completaron 4 bloques propuestos. Cada uno de los bloques fue diseñado para analizar una característica particular o la comparativa de dos alternativas (pantallas de tipo HDD y HUD). Al principio, nosotros estábamos interesados en conocer si los usuarios mostraban interés en nuevas aplicaciones que den soporte a la conducción eficiente y su opinión acerca de su uso en dispositivos HUD. Por otro lado, también buscábamos la realización de una comparativa cuantitativa de dispositivos de tipo HUD frente a dispositivos de tipo HDD. Una de las aplicaciones o servicios más usados dentro de los entornos vehiculares es la navegación GPS por lo que era necesario dedicar un tercer apartado para conocer la opinión de los usuarios acerca de distintos tipos de representación de información de navegación en dispositivos HUD. Por último, queríamos saber la percepción de los usuarios acerca de una posible interacción con el dispositivo. En este sentido, los dispositivos HUD son empleados para mostrar información, pero puede tenerse en consideración la posible interacción para, por ejemplo, cambiar la ruta cuando usamos la navegación o hacer uso de las funcionalidades del teléfono móvil.

Para cumplir con los objetivos mencionados anteriormente, el experimento se diseñó dividido en 4 partes, cada una enfocada a un objetivo. Cada parte tenía una duración aproximada de 5 minutos, incluyendo el tiempo que el usuario se encontraba conduciendo el vehículo y el tiempo necesario para completar el cuestionario de evaluación.

Para saber la opinión de los usuarios, se atendió a un cuestionario compuesto por 4 bloques que contenían preguntas referentes a la incorporación de dispositivos HUD en entornos vehiculares reales. Para cada cuestión, los usuarios debían seleccionar una calificación numérica (de 1 a 5) en una encuesta de tipo escala de Likert. Los valores fueron los siguientes:

- 1: Completamente en Desacuerdo
- 2: Algo en Desacuerdo
- 3: Neutro
- 4: Algo en Acuerdo
- 5: Completamente de Acuerdo

Asistentes para la Eficiencia en la Conducción

Desde hace tiempo, los asistentes para la eficiencia en la conducción han estado presentes en los entornos vehiculares. Debido a ello, algunos fabricantes incorporan sistemas de recomendación a la conducción en sus vehículos. Por lo tanto, resulta indispensable realizar un análisis sobre este tipo de aplicaciones con el objetivo de valorar cómo se representa la información dentro del vehículo. En nuestro caso, utilizamos una aplicación llamada CATED [137]. Esta aplicación fue desarrollada por la

compañía ADN Mobile Solutions y provee al conductor de información sobre algunos indicadores del vehículo que son calculados a través de la información obtenida del puerto OBDII. Un dispositivo conectado a este puerto, provee información al dispositivo móvil (smartphone) usando una conexión Bluetooth.

Como se muestra en la Figura 51, la aplicación muestra información sobre 4 indicadores principales sobre la eficiencia en la conducción que está realizando el usuario. Estos indicadores se calculan teniendo en cuenta las revoluciones por minuto (RPMs), el uso de frenos, la aceleración del vehículo y el tiempo en ralentí. La aplicación muestra alarmas durante el proceso de conducción cambiando el color asociado a cada uno de los indicadores.



Figura 51. Aplicación CATED en un Entorno de Conducción Real

El significado de los colores de alarma detectables por la aplicación es:

- Verde: Conducción Eficiente
- Amarillo: Posible Ineficiencia en la Conducción
- Rojo: Comportamiento Ineficiente

El sistema permite al usuario adaptar su comportamiento con el objetivo de conseguir reducir el consumo de combustible y, por tanto, reducir el número de emisiones al medio ambiente.

Inicialmente, la aplicación fue diseñada para visualizar la información en una pantalla convencional debiendo adaptar la interfaz de forma adecuada para su correcta visualización sobre dispositivos de tipo HUD. Como consecuencia, se decidió diseñar un fondo lo más oscuro posible y al carácter estático de los contenidos para no producir distracciones en el proceso de conducción.

Esta parte de la experimentación transcurría en un periodo aproximado de 5 minutos teniendo en todo momento el asistente de conducción activo. Dentro del proceso de

conducción, el investigador que acompañaba al usuario conductor daba las indicaciones oportunas para que la prueba transcurriera según los cauces preestablecidos.

En este caso, la encuesta posterior abarcaba cuestiones sobre la visualización de la aplicación como el color, la transparencia y la dinamicidad de los contenidos presentados sobre dispositivos HUD.

Comparativa de Dispositivos HUD frente a Dispositivos HDD

Un aspecto fundamental a analizar es la comparativa de los dispositivos HUD (de reciente aparición) con respecto a las pantallas convencionales usadas hasta ahora en los entornos vehiculares para evaluar los beneficios que produce su implantación. Por ese motivo, a parte del uso del dispositivo recPOP, hemos usado la propia pantalla del teléfono móvil para evaluar la comparativa de las diferentes representaciones de información.

En este caso, los usuarios conducían aproximadamente durante 5 minutos con el smartphone en funcionamiento para continuar con otro proceso de conducción de 5 minutos haciendo uso del dispositivo HUD. En ambos casos, la aplicación que se ejecutaba era la de *Google Maps* (actualmente conocida como *Google Map Navigation* y que está integrada en *Maps*) considerándola una aplicación de amplia difusión entre los usuarios.

La Figura 52, muestra la localización de las dos pantallas de representación de información usadas en los experimentos. Es importante destacar la ubicación de cada uno de los dispositivos. Por un lado, podemos observar el dispositivo con pantalla convencional (smartphone) ubicado en la parte derecha del frente del conductor para no reducir la visibilidad lineal del mismo. Por este motivo, elegimos una pantalla de reducidas dimensiones. Por otro lado, el dispositivo recPOP está ubicado justo en frente del conductor comprobando si las condiciones de visibilidad eran adecuadas.



Figura 52. HUD (izquierda) vs. HDD (derecha)

Navegación GPS

Una de las aplicaciones de asistencia más usadas por los conductores actualmente es la navegación GPS. Actualmente, muchos vehículos incorporan, de fábrica, este tipo de aplicaciones. Además de esto, muchos usuarios compran dispositivos de navegación GPS o hacen uso del teléfono móvil para este fin. Por ese motivo, consideramos fundamental realizar un análisis en profundidad del uso de la navegación GPS usando dispositivos de tipo HUD. En este caso, se usaron dos aplicaciones de navegación: Google Maps y HUDWAY. La Figura 53, muestra ambas aplicaciones en funcionamiento durante una prueba real.



Figura 53. Aplicaciones de Navegación GPS (Google Map (izquierda) y HUDWAY (derecha)) corriendo en una prueba real sobre el dispositivo HUD

En este caso, Google Maps es una navegación de propósito general desarrollada por Google Inc. que muestra una interfaz altamente dinámica en la cual se dispone de mucha información. Como muestra la Figura 53 (izquierda), los colores luminosos incrementan la opacidad de la pantalla y dificultan la visualización de la vía. Por otro lado, HUDWAY es una aplicación designada para su uso en HUDs. Como podemos observar en la Figura 53 (derecha) sólo se representa la información necesaria para la conducción sobre un fondo oscuro, teniendo en cuenta únicamente la vía de circulación y la velocidad actual del vehículo, así como la máxima de la vía.

Para la realización de este estudio, el conductor realizaba una prueba de 5 minutos de duración con la aplicación HUDWAY corriendo en el dispositivo. Se obvió la prueba haciendo uso de *Google Maps* porque ya había sido tenida en cuenta en la prueba anterior (Comparativa entre HDD y HUD). En esta ocasión, los usuarios evaluaban las diferencias del diseño de interfaces para este tipo de representaciones para evaluar los posibles efectos producidos por el color y la dinamicidad de información representada sobre el dispositivo.

Futura Interacción con Dispositivos HUD

Ya que en muchas ocasiones debemos interactuar con el vehículo para obtener información o simplemente para realizar tareas, siempre y cuando no pongan en riesgo

la seguridad al volate, consideramos vital el estudio de la posibilidad de la interacción del conductor con este tipo de dispositivos.

Con el objetivo de comparar diferentes tipos de interacción con el dispositivo preguntamos a los usuarios (en el cuestionario de evaluación final) algunas cuestiones relacionadas con los diferentes métodos de interacción entre las que encontramos:

- Uso de gestos básicos, por ejemplo, el movimiento de un dedo o el movimiento básico de la cabeza.
- Reconocimiento de voz, por ejemplo, con la predefinición de comandos en el dispositivo.
- Interacción directa con el dispositivo, por ejemplo, a través de la pulsación en una pantalla táctil o botones del dispositivo.

Los resultados obtenidos en este bloque fueron muy importantes, ya que sirvieron como base para el diseño y desarrollo de la segunda fase de la experimentación. En esa segunda etapa, evaluamos el método de interacción más popular que fue seleccionado por los usuarios.

5.3.3.3. Fase 2: Interacción con Dispositivos HUD Usando Reconocimiento de Voz

A la vista de los resultados de la última parte de la Fase 1 (futura interacción con dispositivos HUD), donde el método de interacción preferido por los usuarios era el de reconocimiento de voz, nos propusimos la realización de una experimentación haciendo uso de este tipo de interacción en un contexto vehicular.

En esta parte del estudio, un total de 30 conductores no profesionales participaron en los experimentos. Al igual que en la fase anterior, el usuario debía proceder a la conducción durante un periodo de tiempo determinado para evaluar la posible interacción con los dispositivos. Esto nos permitía comparar a la cantidad de la muestra que ya había utilizado dispositivos de tipo HUD (en la fase 1) y la que no lo había hecho, con el objetivo de no tener prejuicios sobre este tipo de sistemas conociendo su opinión antes y después de finalizar los experimentos.

Para obtener la información relativa a la opinión de los usuarios se volvió a usar un cuestionario de evaluación de tipo Escala de Likert con valores comprendidos entre 1 y 5 dependiendo del grado de acuerdo con las afirmaciones que se planteaban. Dentro de la encuesta, se consultó a los usuarios por la viabilidad del uso de este tipo de sistemas, la aceptación de la interacción mediante reconocimiento de voz, por la seguridad usando este tipo de interacción en un entorno de conducción y las aplicaciones que consideran importantes dentro de su vida cotidiana para este tipo de entornos. En esta ocasión, también se planteaba a los usuarios una cuestión con respuesta abierta para que ellos fueran capaces de ofrecer información adicional sobre las aplicaciones que consideraban necesarias para su uso dentro de un contexto de conducción.

Una vez que se recogía la opinión inicial de los usuarios, ellos debían realizar un proceso de conducción atendiendo a dos métodos de interacción diferentes mediante el uso de reconocimiento de voz. En este caso:

- **Comandos de voz:** Esta es la opción más directa de interacción por voz, teniendo un conjunto de comandos preinstalados en el dispositivo que proporcionan instrucciones al sistema. Este método puede ofrecer una precisión bastante alta y un nivel de dificultad de implementación bajo. Sin embargo, uno de los inconvenientes más acentuados es que los usuarios deben aprender previamente los comandos de uso del sistema y todas las posibles interacciones deben ser diseñadas de antemano.
- **Mapa Numérico (uso de códigos):** En este caso, el sistema proporciona al usuario una interfaz con un mapa numérico en función de las opciones que aparecen en pantalla. Por ejemplo, los iconos del menú mostrados en la pantalla del menú del dispositivo móvil están identificados numéricamente, de esta forma el usuario deberá mencionar el número al que quiere acceder para abrir la aplicación correspondiente. Este sistema es fácil de implementar y de usar, y no requiere de un aprendizaje previo por parte del usuario. Sin embargo, en esta ocasión el usuario deberá mirar atentamente a la pantalla para identificar la codificación numérica que presenta.

La Figura 54 muestra las dos interfaces propuestas haciendo uso de los dos métodos de interacción explicados anteriormente.

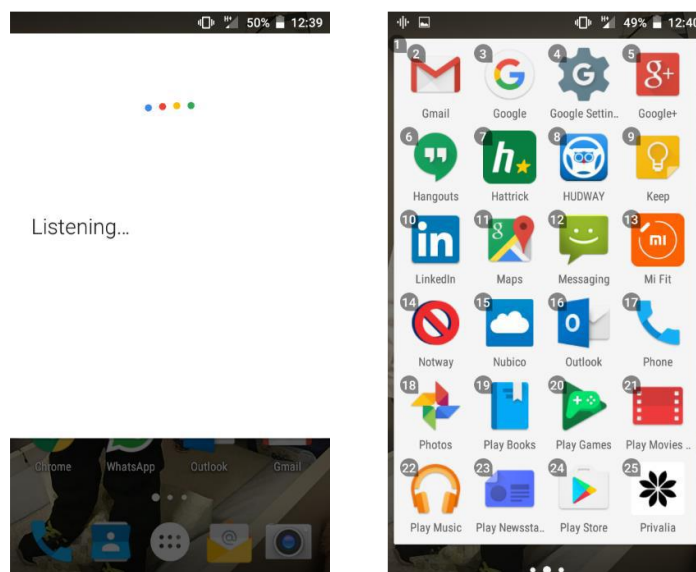


Figura 54. Google Now Launcher (comandos de voz predefinidos (izquierda)) y Voice Access (interacción numérica (derecha))

Para determinar las preferencias de los usuarios sobre el uso de ambos métodos de interacción, los participantes tenían que conducir durante, aproximadamente, 10 minutos en cada uno de los casos. Durante ese tiempo, el conductor debía llevar a cabo algunas tareas, explicadas por el investigador acompañante, para realizar la experimentación de forma efectiva. Las tareas estaban relacionadas con:

- **Uso Básico del Sistema:** En nuestro caso buscábamos la interacción con el dispositivo para la realización de actividades básicas con el teléfono móvil como abrir una aplicación y visualizar la información mostrada sobre el HUD. Concretamente esta tarea estaba relacionada con la apertura de la aplicación para la eficiencia en la conducción (CATED) y la apertura desde el menú de la agenda de contactos para posteriormente poder realizar una llamada o enviar un mensaje de texto.
- **Tareas de Comunicación:** La comunicación es una de las principales tareas para las que se utilizan los teléfonos. Por ello, el usuario, mediante interacción usando su propia voz, debía responder a una llamada entrante, realizar una llamada y enviar un mensaje de texto.
- **Navegación GPS:** Como hemos dicho previamente, la navegación es uno de las aplicaciones más comunes dentro de los entornos vehiculares. Debido a ello, decidimos evaluar cómo era la interacción (mediante comandos de voz) con este tipo de aplicaciones iniciando una ruta o cambiando la ruta una vez iniciada.

La Tabla 33 muestra la lista de acciones y tareas realizadas por los conductores haciendo uso de los dos métodos de interacción mediante reconocimiento de voz considerados en el experimento.

Parte	Tarea/Acción
Uso Básico del Sistema	Abrir aplicación CATED
Tareas de Comunicación	Realizar una llamada telefónica
	Enviar un mensaje de texto
	Acceder a información de los contactos
Navegación GPS	Abrir la aplicación de navegación
	Comenzar la navegación estableciendo una ruta inicial
	Modificar la ruta inicial

Tabla 33. Partes y Tareas del Bloque 3

Al igual que en el caso anterior (Fase 1), para evaluar la opinión de los usuarios que realizaron el experimento, diseñamos otro cuestionario con 4 preguntas para cada uno de los métodos de interacción mediante reconocimiento de voz en una encuesta de tipo Escala de Likert con valores de 1 a 5 (dependiendo del grado de conformidad con las afirmaciones realizadas). Mediante este tipo de cuestiones los usuarios podían valorar cada uno de los métodos de forma independiente. Adicionalmente, se añadieron 7 preguntas enfocadas a la comparativa entre ambos métodos. En este caso, las opciones disponibles para responder cada afirmación eran ligeramente diferentes:

- -2: Completamente a favor de *Google Now Launcher*
- -1: Ligeramente a favor de *Google Now Launcher*
- 0: Misma opinión para ambos métodos
- 1: Ligeramente a favor de *Voice Access*
- 2: Completamente a favor de *Voice Access*

Finalmente, también se brindaba la oportunidad de una pregunta de respuesta abierta para que los usuarios pudieran expresar su opinión y comentarios sobre el proceso de experimentación completo.

5.3.4. Discusión de Resultados

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos para cada una de las fases del estudio. Los datos en crudo obtenidos de los cuestionarios fueron procesados usando las aplicaciones de Microsoft Excel y R, realizando diferentes análisis estadísticos buscando diferencias entre grupos de usuarios definidos previamente. Para este propósito se utilizaron algunos de los test más comunes para este tipo de análisis que dependían de las características de normalidad y homocedasticidad. Para comprobar la normalidad de la muestra utilizábamos el test de *Saphiro-Wilk*, en el caso de la homocedasticidad utilizábamos el test de *Barlett*. Cuando la muestra cumplía con la normalidad y homocedasticidad procedíamos a aplicar un test *t-student* con un coeficiente del 95% (α -value = 0.05). Por otro lado, cuando el test que comprobaba la homocedasticidad fallaba, usábamos el test de *Kruskal-Wallis*. Este test también se usaba en situaciones de fuerte fallo en normalidad con *p-values* sobre 0.05.

Como hemos mencionado anteriormente, la discusión de resultados se realiza en base a las diferencias significativas encontradas entre diferentes agrupaciones de usuarios. Estos grupos fueron clasificados en función de su edad, género, experiencia en la conducción y uso habitual de pantallas convencionales en sus vehículos según los siguientes criterios:

- Edad: Menores de 40 años / 40 o más años (<40 / >=40)
- Género: Hombres / Mujeres

- Experiencia en la Conducción: Más de 15 años / 15 años o menos (>15 / <=15)
- Uso Habitual de Dispositivos: Si / No

5.3.4.1. Fase 1: Incorporación de Dispositivos HUD en Entornos Vehiculares Reales

El análisis y discusión de resultados se presenta dividido en las pruebas que definían la Fase 1: Asistentes para la Eficiencia en la Conducción, Comparativa de Dispositivos HUD frente a Dispositivos HDD, Navegación GPS y Futura Interacción con Dispositivos HUD.

Asistentes para la Eficiencia en la Conducción

El objetivo de esta parte se basaba en la evaluación del uso de un asistente para la eficiencia en la conducción (CATED) en combinación con el uso del dispositivo HUD.

En general, los usuarios muestran unos altos niveles de aceptación de este tipo de aplicaciones para su visualización en dispositivos de tipo HUD. Todas las cuestiones planteadas en ese sentido fueron tenidas muy en cuenta por los conductores, mostrando unos niveles próximos a 5 (máximo valor en la encuesta de tipo Likert). Además, los usuarios consideran que este tipo de aplicaciones son seguras en el entorno de conducción (concediendo una media de 4,05 puntos sobre 5).

Aunque al realizar el análisis estadístico encontramos ligeras diferencias entre los grupos planteados anteriormente, no detectamos que estas diferencias sean significativas salvo en el análisis por grupos de usuarios que han utilizado previamente, y de forma habitual, dispositivos en sus vehículos (*p-value* < 0,03). La Figura 55, presenta los valores de las respuestas para ambos. Como podemos ver los usuarios que hacen uso habitual de pantallas en sus vehículos aceptan de una forma más amplia la solución propuesta. A pesar de las diferencias encontradas, podemos observar que en todos los casos los valores de conformidad con el uso de este tipo de asistentes en HUDs son aceptables teniendo un valor mínimo, superior a la media de los posibles valores (1-5), de 3,25 puntos sobre 5.

Otra conclusión interesante de esta parte del estudio es que los usuarios consideran que el contenido mostrado en la aplicación de conducción eficiente debe ser lo más estático posible (con media de puntuación de 4,35 sobre 5) debido a que la representación de contenidos altamente dinámicos puede aumentar los niveles de distracción del conductor al volante.

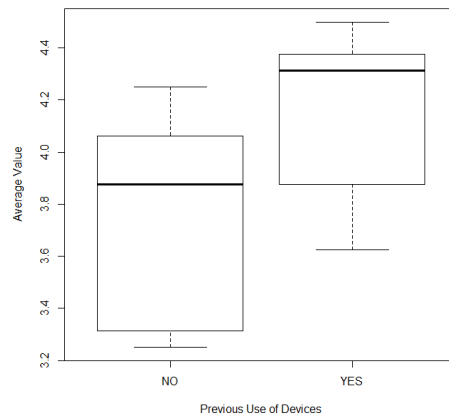


Figura 55. Valores medios de aceptación para asistentes de conducción eficiente usados con HUD en función de los usuarios que usan regularmente pantallas en el vehículo (derecha) y los que no las usan (izquierda)

Comparativa de Dispositivos HUD frente a Dispositivos HDD

En esta prueba, los usuarios debían comparar el uso de dispositivos de tipo HUD frente a dispositivos de tipo HDD.

En general, encontramos que el uso de HUD (frente a HDD) mejora la percepción de seguridad al volante obteniendo una calificación de 4,15 sobre 5. Cuando realizamos un análisis más exhaustivo de la información, no encontramos diferencias significativas entre los grupos diferenciados por edad, género o experiencia en la conducción. Al igual que en el caso anterior, la única diferencia remarcable se realiza cuando dividimos los grupos por el uso habitual de pantallas de tipo HDD en el vehículo ($p\text{-value} < 0,01$). En este caso, si analizamos por separado los niveles de aceptación para HUDs y para HDDs, encontramos diferencias significativas, obteniendo un $p\text{-value} < 0,02$ para el primer caso y un $p\text{-value} < 0,05$ para el segundo. Además, los usuarios de ambos grupos prefieren claramente el uso de HUDs frente al uso de HDD como muestra la Figura 56, confirmando los resultados obtenidos en el test anterior. No obstante, como observamos, los valores son altos en ambos casos, demostrando que los usuarios que no usan habitualmente los asistentes de conducción son más reacios a cambiar sus hábitos.

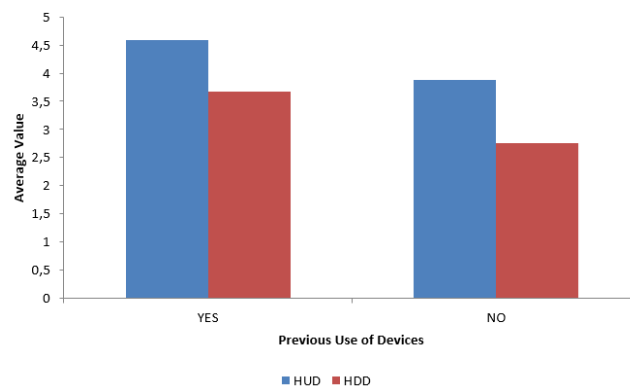


Figura 56. Valores medios de aceptación para el uso de pantallas HDD o HUD en función de los usuarios que usan regularmente pantallas en el vehículo (izquierda) y los que no las usan (derecha)

Navegación GPS

El objetivo de esta parte de la investigación era el de realizar una evaluación del uso de asistentes a la navegación GPS haciendo uso de dispositivos de tipo HUD. Como en las pruebas anteriores, en general los usuarios muestran una alta aceptación de este tipo de tecnología, obteniendo unos altos valores en las preguntas efectuadas.

Si consideramos la diferenciación de grupos expresada con anterioridad, encontramos leves diferencias (no significativas) entre ellos, exceptuando de nuevo el grupo que hacía uso regular de dispositivos de información en sus vehículos ($p\text{-value} < 0,04$). En esta ocasión la Figura 57, muestra la media de valores de las respuestas obtenidos en ambos casos. Como podemos ver, ambos grupos otorgan un valor alto al uso de este tipo de sistemas de navegación en el vehículo, pero de nuevo, los usuarios con una experiencia previa en el uso de dispositivos de representación de información abordo muestra un nivel más alto de aceptación, confirmando los resultados de las pruebas anteriores.

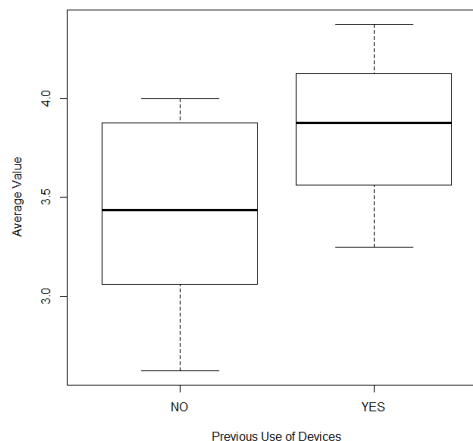


Figura 57. Valores medios de aceptación para el uso de aplicaciones de navegación GPS en función de los usuarios que usan regularmente pantallas en el vehículo (derecha) y los que no las usan (izquierda)

Con respecto al diseño de los asistentes, comparamos dos interfaces de representación de información (Google Maps y HUDWAY). En esta ocasión, los usuarios estaban de acuerdo con el uso de interfaces de presentación de información adecuadas al tipo de dispositivo en el que se representan, en este caso, HUDWAY en dispositivos HUD. De nuevo, los usuarios creen conveniente que el contenido mostrado por las aplicaciones sea lo más estático posible con el fin evitar posibles distracciones (4,05 puntos sobre 5). Esto reafirma la opinión obtenida en la primera prueba (asistentes para la conducción eficiente). Por otro lado, los usuarios están de acuerdo con los niveles de transparencia que se obtienen mediante la visualización de información sobre un fondo negro (en HUDWAY) y únicamente mostrando la información esencial que permita el proceso de guiado que ofrecen las aplicaciones de navegación. Por último, los usuarios creen que los colores usados en la aplicación HUDWAY eran mejor que los usados en *Google Maps* obteniendo una calificación de casi 4 puntos sobre el total (5).

Futura Interacción con Dispositivos HUD

En esta parte de la investigación, se buscaba conocer la opinión de los usuarios acerca de una posible interacción con el dispositivo HUD. Para ello se proponían algunas cuestiones que hacían referencia a diferentes métodos de interacción con los dispositivos embarcados preguntando acerca de la idoneidad de una posible comunicación haciendo uso de reconocimiento de voz, movimientos gestuales básicos o la interacción directa con la pantalla. Por otro lado, también se preguntaba si una futura interacción con el dispositivo era necesaria y segura. En general, los usuarios piensan que una posible interacción con el dispositivo en un proceso de conducción puede ser necesaria y a la vez segura, no obteniendo resultados muy elevados en este último ítem (media de 3,55 puntos de 5). A pesar de que se encuentran ligeras diferencias cuando efectuamos el análisis por los grupos propuestos, no se encuentran discrepancias significativas en ninguno de ellos.

Entre los posibles métodos de interacción que se proponían (gestos básicos, reconocimiento de voz o pulsaciones en pantalla táctil). En líneas generales, los usuarios creen que el método más apropiado en un entorno de conducción es el reconocimiento de voz con un valor media de 4,35 puntos sobre 5, principalmente debido a razones de seguridad al no tener que interactuar realizando ningún movimiento que pueda producir que el nivel de seguridad disminuya. Como segunda opción, los usuarios creen que se podría usar un método basado en el reconocimiento de gestos básicos (como el movimiento de un dedo o la cabeza) con una puntuación media de 3,2 sobre 5. El método de interacción directa mediante pulsaciones sobre una pantalla táctil sería el método menos aceptado por los usuarios obteniendo una puntuación relativamente baja (2,1 sobre 5). A pesar de que los métodos de interacción menos valorados (detección de gestos básicos o interacción directa) están presentes en muchos navegadores GPS convencionales o dispositivos de tipo HUD, como Navdy¹⁴, los usuarios están a favor de emplear su voz para la interacción con los dispositivos con el objetivo de no liberar los controles del coche y poner en riesgo su seguridad.

Como hemos mencionado con anterioridad, al realizar el análisis dividiendo la muestra poblacional en grupos de usuarios no encontramos diferencias significativas. A pesar de ello, incluimos la Figura 58, que muestra el valor medio de la opinión de usuarios en función de su edad. En este caso, si comparamos la opinión de usuarios que tienen menos de 40 años con usuarios que tienen 40 o más encontramos una ligera discrepancia en el caso del uso de gestos básicos y reconocimiento de voz. Podemos observar también como, la gráfica confirma el argumento presentado en esta sección donde el método de interacción que mayor valoración obtiene es el del reconocimiento de voz.

¹⁴ <https://www.navdy.com>

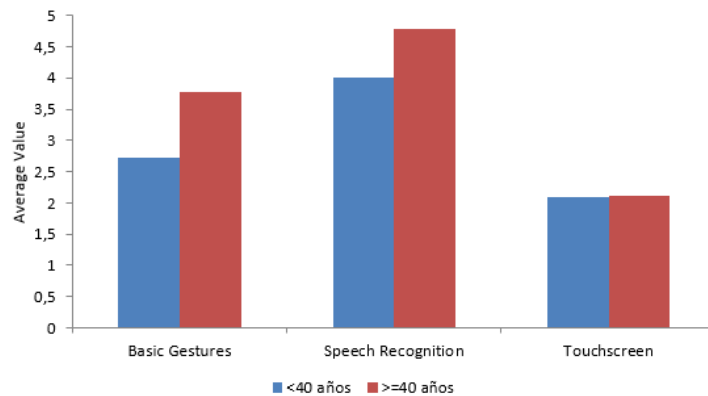


Figura 58. Métodos de interacción con dispositivos HUD dependiendo de la edad de los usuarios

A la vista de los resultados obtenidos, la siguiente fase enfocará su análisis en la evaluación de la interacción de usuarios y dispositivos HUD haciendo uso del método de interacción más valorado por los mismos: El Reconocimiento de Voz.

5.3.4.2. Fase 2: Interacción con Dispositivos HUD Usando Reconocimiento de Voz

Para realizar el análisis de esta fase, también tendremos en cuenta los grupos de usuarios que hemos definido en la discusión y análisis de la anterior fase. En este caso, también dividiremos el análisis en dos, teniendo por un lado la opinión previa de los usuarios sobre la interacción con dispositivos de tipo HUD y por otro la Evaluación y comparación de métodos de interacción por voz (haciendo uso de los métodos empleados por *Google Now Launcher* y *Voice Access*).

Opinión Previa de Usuarios sobre la Interacción mediante Comandos de Voz con dispositivos HUD

Antes de la realización del proceso de conducción guiada en la que los usuarios interactuaban con dispositivos HUD, el participante debía responder a un cuestionario preliminar que nos permitía conocer cuál era la idea a priori de los conductores sobre el uso de reconocimiento de voz en los entornos vehiculares.

La mayoría de usuarios que participaron en esta fase de la investigación (86,66% con valores de entre 4 y 5 en la escala 1-5) estaban de acuerdo con la afirmación que proponía este método como mejor solución para una posible interacción en el entorno vehicular. Teniendo en cuenta que la mayoría de usuarios no participaron en la fase 1 del experimento, podemos confirmar los resultados obtenidos previamente. Además de eso, el 76,66% de los usuarios piensan que la interacción con el vehículo mediante comandos de voz no reduce los niveles de seguridad mientras conducen, puntuando con valores de entre 4 y 5. Acerca de la usabilidad de este tipo de interacción, encontramos un valor de 3,72 sobre 5, por lo que en general, los usuarios lo aceptan de forma amplia como un método de interacción adecuado.

Considerando la separación de grupos explicada anteriormente, no se encuentran diferencias significativas, pero sí ligeras discrepancias. No obstante, encontramos resultados ligeramente diferentes cuando atendemos a los grupos de usuarios que usan habitualmente pantallas de información en sus vehículos y los que no lo hacen obteniendo un p -value de 0,064. La Figura 59, presenta los valores medios obtenidos en el caso de estos grupos de usuarios. Como podemos ver, ambos conjuntos están de acuerdo con el uso del reconocimiento de voz como método de interacción con dispositivos HUD, obteniendo unos valores mayores en el caso de los usuarios que usan habitualmente pantallas de representación de información en sus vehículos.

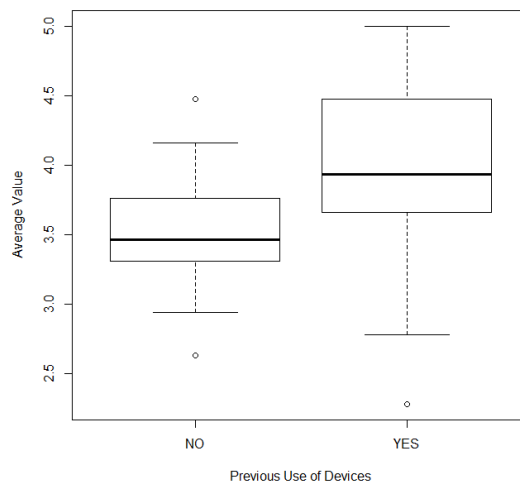


Figura 59. Valores de aceptación media del uso del reconocimiento de voz como método de interacción con dispositivos HUD en función de usuarios que usan regularmente dispositivos (derecha) y usuarios que no los usan (izquierda)

Finalmente se planteaba una cuestión abierta para que el usuario opinara sobre el tipo de aplicaciones que consideraba importantes dentro del vehículo. La aplicación más popular fue la de Navegación GPS, siendo mencionada por la totalidad de los participantes. También se considera importante la opción de poder utilizar las funciones básicas del teléfono, como llamar, recibir una llamada, enviar un mensaje de texto, o buscar un contacto en la agenda, teniendo un 66,6% de usuarios que así lo expresaron. Finalmente, algunos participantes comentaron varias aplicaciones dedicadas al “infotainment” como la reproducción de música o la información sobre el tráfico y las condiciones climáticas en tiempo real.

Evaluación y Comparación de Métodos de Interacción por Voz

Una vez que los participantes en el experimento completaban el proceso de conducción haciendo uso del método de interacción mediante reconocimiento de voz, tenían que completar otro cuestionario con el objetivo de conocer qué método (*Google Now Launcher* o *Voice Access*) era el más apropiado, realizando una comparativa entre ellos.

Si analizamos por separado ambos métodos de interacción por voz, el valor medio de aceptación de *Google Now Launcher* es de 3,87 (sobre 5) con una desviación estándar

de 0,57, teniendo una valoración media de 2.41 (sobre 5) para el segundo método (*Voice Access*). Comparando las puntuaciones obtenidas por ambos métodos encontramos, a la vista de los resultados, diferencias significativas con un $p\text{-value} < 0,01$. Podemos deducir, que los usuarios prefieren no tener que mirar a la pantalla para localizar los números mostrados por *Voice Access* por razones de seguridad, a pesar de que tengan que realizar un pequeño proceso de aprendizaje previo al uso de *Google Now Launcher* u otro medio de interacción por voz que contemple la posibilidad de la definición de comandos predefinidos en el dispositivo.

Analizando las respuestas de los conductores en función de los grupos de usuarios creados en el experimento, podemos ver que hay algunas diferencias dependiendo de cómo se clasifican los participantes. En el caso del método de interacción mediante el uso de *Google Now Launcher*, no encontramos diferencias significativas entre los grupos, a pesar del hecho de que hay diferencias notables si consideramos la clasificación en función de la edad (<40 frente a ≥ 40) o los grupos que hacen uso habitual de dispositivos en su proceso de conducción o no. Por otro lado, haciendo referencia al método mediante *Voice Access*, si se encuentran discrepancias significativas entre el grupo de usuarios que usaban de forma habitual dispositivos de los que no lo hacían encontrando un $p\text{-value} < 0,01$. Por último, merece la pena recalcar que se encontraron ligeras diferencias cuando se realizaba el análisis por género, pero no eran significativas.

La Figura 60, muestra las puntuaciones medias obtenidas para ambos métodos de interacción cuando consideramos los grupos de usuarios en los que encontramos diferencias notables (uso regular de dispositivos en el vehículo frente a los que no los usan). Como vemos, la opinión general sobre el método de *Google Now Launcher* es mucho más elevada que en el caso de *Voice Access*. Además, los usuarios que hacen uso regular de dispositivos en sus automóviles muestran unos niveles de aceptación mayor para ambos métodos que los usuarios que no están habituados a usar dispositivos en sus vehículos.

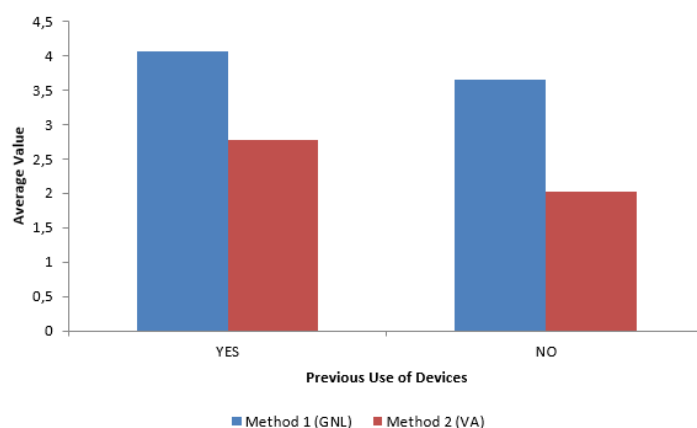


Figura 60. Valores de aceptación media para Google Now Launcher (GNL) y para Voice Access (VA) en función de usuarios que usan regularmente dispositivos (izquierda) y usuarios que no los usan (derecha)

Si analizamos por separado los métodos de interacción, la opinión general de los usuarios tiende a *Google Now Launcher* (haciendo uso de un conjunto de comandos de voz), considerándolo como mejor opción para la interacción con dispositivos HUD en un entorno de conducción. A pesar del hecho de que este método obliga a los usuarios a aprender una serie de comandos previamente, el enfoque de *Voice Access* no es apropiado para un ambiente vehicular porque requiere que los usuarios presten atención a la pantalla y no a la carretera.

En la última parte del cuestionario se planteaba la comparativa entre los dos métodos de interacción por voz atendiendo a 7 tareas de uso común que se podían llevar a cabo dentro del vehículo. Los resultados sobre estas cuestiones están plasmados en la Figura 61, donde cada histograma corresponde a una tarea concreta. Las letras que encontramos en los títulos (A, B y C) hacen referencia a cada una de las tres partes de la evaluación: A = Uso básico del sistema, B = Tareas de Comunicación y C = Navegación GPS. El eje x de las gráficas corresponde a los valores mencionados anteriormente (de -2 a 2) para la selección del método de interacción apropiado a cada una de las tareas. Para mejorar la información, cada una de las gráficas también incluye una línea de tendencia que da una idea del método más apropiado para la clase de tarea que se evalúa.

La Figura 61, evidencia que generalmente los usuarios opinan que el uso de *Google Now Launcher* es más apropiado que el de *Voice Access* para la realización de las mencionadas tareas. Sin embargo, se produjo una excepción en la evaluación de la apertura de aplicaciones en el móvil, en nuestro caso de asistencia a la conducción CATED o la navegación GPS, en la que muchos de ellos otorgaron la misma puntuación a los dos métodos (0). El motivo se sustenta en que el acceso a la aplicación se realizaba de forma similar en ambos casos. No obstante, en el resto de situaciones evaluadas los usuarios se decantaron por el uso del sistema *Google Now Launcher*. Recordamos que la interacción conductor-vehículo con *Google Now Launcher* se realizaba simplemente con la mención del nombre del servicio mientras que en *Voice Access* se debía atender a la pronunciación de un número determinado que se presentaba en pantalla. A pesar de que *Google Now Launcher* fue mejor valorado, un total de 2 usuarios eligieron *Voice Access* como mejor método para realizar algunas de las tareas estudiadas. La razón se fundamenta en que, en realidad, *Google Now Launcher* también presenta algunas limitaciones como por ejemplo iniciar una ruta después de elegir un destino en la navegación GPS.

Considerando a los diferentes grupos de usuarios creados, no encontramos diferencias significativas en los valores obtenidos para la aplicación de cada uno de los métodos en la realización de las diferentes tareas.

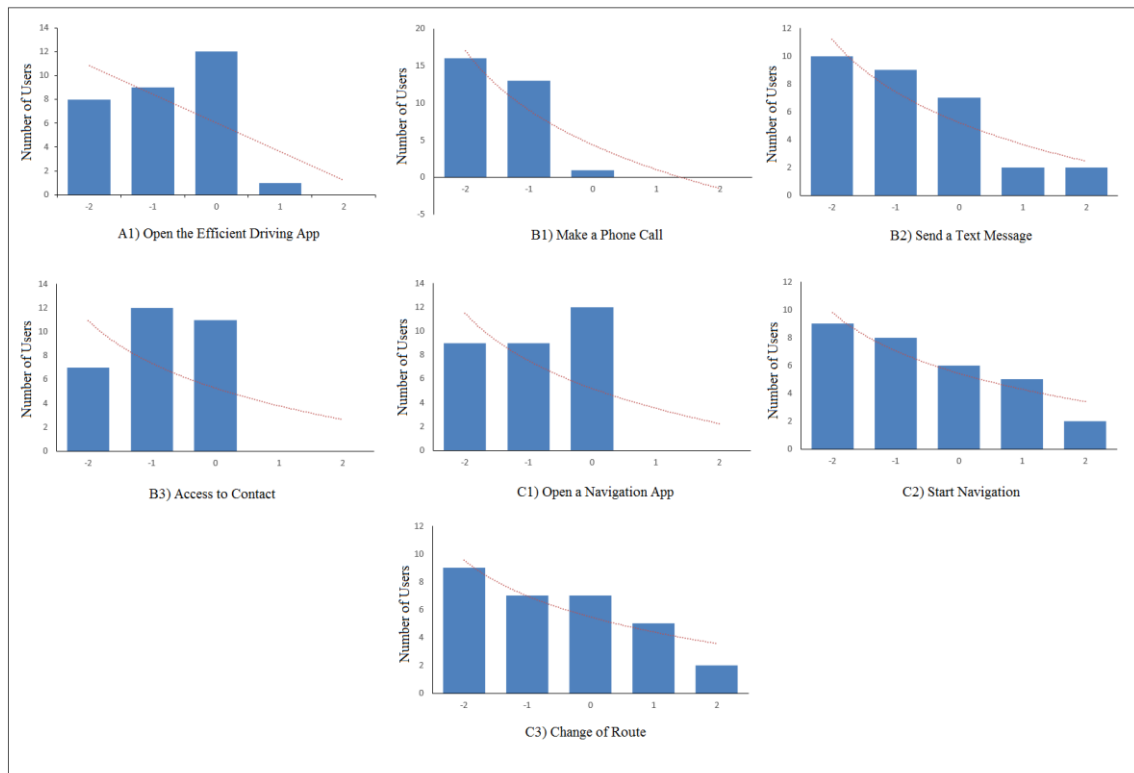


Figura 61. Preferencia de método de interacción por voz para cada tarea realizada

Por último, si consideramos los comentarios realizados por los usuarios que respondieron a la última cuestión, encontramos las motivaciones principales para la selección de uno u otro método de interacción. En el caso de *Google Now Launcher*, los usuarios creen que es apropiado para un entorno de conducción a pesar de que tienen que atender a un previo aprendizaje de los comandos. Aun así, los participantes piensan que este método todavía tiene un amplio margen de mejora para poder abarcar todas las tareas necesarias dentro de un contexto de conducción. Por otro lado, los usuarios creen que el método de *Voice Access* no es un método apropiado para este tipo de entornos porque requiere que el conductor esté constantemente visualizando la pantalla y fijando la vista en números que no siempre son del tamaño adecuado incrementado, de este modo, la sensación de inseguridad en el proceso de conducción.

5.3.5. Conclusiones

Mediante la realización del presente estudio, presentamos un análisis detallado de la incorporación de dispositivos de tipo HUD en entornos vehiculares reales. Los estudios incluyen aspectos tanto de usabilidad del dispositivo como método de acceso a información como de interacción real entre persona y máquina (HCI). Los resultados muestran que, en general, los usuarios prefieren usar dispositivos de tipo HUD en lugar de las pantallas convencionales llegando a un 65% de usuarios que consideran mejor el uso de HUDs frente al uso de HDD (pantallas convencionales) y valorando el 35% restante que su uso es igual. En este contexto, ningún usuario consideró que el uso de dispositivos de tipo HDD fuera mejor que el de dispositivos de tipo HUD.

Otra conclusión interesante del estudio vino dada en función de la distinción de usuarios en función del uso de pantallas convencionales (o dispositivos de información) en su vehículo de forma regular respecto a los que no tenían en cuenta este tipo de dispositivos, teniendo una clara preferencia a favor de los dispositivos HUD los usuarios que utilizan pantallas de información de forma cotidiana de los que no las usan.

Pese a que algunos modelos de vehículos están empezando a implantar pantallas HUD en sus creaciones, el despliegue amplio de la tecnología todavía no se ha llevado a cabo. A pesar de ello, el uso de dispositivos de tipo HUD es ampliamente aceptado por parte de los usuarios que participaron en los experimentos teniendo un 75% de conductores a favor del uso de este tipo de soluciones (con puntuaciones de entre 4 y 5 (sobre 5)). En cuanto a la navegación GPS, una de las aplicaciones más extendidas a nivel usuario, también encontramos que la mayoría de ellos prefieren acceder a este tipo de aplicaciones mediante el uso de HUD en lugar de HDDs (70%). Otras de las principales conclusiones extraídas del estudio están relacionadas con el diseño de las aplicaciones que podrían utilizarse en un contexto de conducción. Los HUD deben mostrar la información lo más estática posible para no distraer al conductor de forma innecesaria. Además, es necesario evitar poner demasiada información en la pantalla que pueda inducir a una falla en la seguridad vial a causa de la distracción producida por la misma. Otro dato a tener en cuenta son los colores de las diferentes aplicaciones debiendo mantener un fondo tan oscuro como sea posible para aumentar el grado de transparencia que ofrece el dispositivo HUD.

En cuanto a la interacción con el dispositivo, los usuarios están a favor de que algunas aplicaciones pueden necesitar un método para proporcionarles ciertas instrucciones o información por lo que, los dispositivos HUD también deben estar provistos de un mecanismo de interacción que permita al usuario comunicarse con ellos sin reducir el nivel de seguridad en la conducción. En este contexto, la opinión general de los usuarios es que el reconocimiento de voz es el mejor método para interactuar con un HUD. Por razones de seguridad, a los usuarios no les interesan en demasía los métodos que requieren dejar de interactuar de forma habitual con el vehículo, por ejemplo, soltar el volante o distraer la mirada de la carretera. Llegados a este punto, la mejor opción en relación a los métodos de reconocimiento de voz analizados es usar un conjunto de comandos de voz predefinidos, a pesar de que esto requiere del aprendizaje previo de los mismos por parte de los usuarios. Este método permite a los conductores evitar distracciones al volante, teniendo en todo momento la información deseada en pantalla.

Al encontrarnos actualmente en un periodo de expansión de este tipo de tecnologías, podemos concluir que aún queda mucho por investigar dentro de este campo. Habrá que esforzarse en realizar análisis de otros dispositivos que puedan proporcionar información enriquecida de forma adecuada, evaluando diferentes variables dentro del entorno vehicular, como la incorporación de cámaras en el habitáculo del vehículo, la fatiga en la conducción que provoca este tipo de dispositivos, la inclusión de aspectos cognitivos humanos dentro de la conducción, etc.

Dentro del ámbito de la presente Tesis Doctoral, también es interesante el uso de este tipo de dispositivos para el desarrollo e implantación de nuevas aplicaciones en entornos reales. Mediante el uso de estos servicios, se pueden solucionar problemas como el aviso de accidentes o la información del tráfico en tiempo real mediante posibles comunicaciones vehiculares dentro de las redes VANET, como se desarrolló en el Capítulo 3, consiguiendo una correcta visualización del contenido de las mismas e intentando minimizar los riesgos de seguridad que supone el incremento de la cantidad de información en el habitáculo del vehículo.

5.4 Contribuciones del Capítulo

Desde la aparición de nuevas aplicaciones y servicios, tanto para redes de tipo VANET como para entornos vehiculares individuales, el gran incremento de la información que está accesible dentro de la cabina del vehículo es un hecho contrastado que, en muchas ocasiones, puede ocasionar una pérdida de la seguridad en el proceso de conducción.

Desde hace tiempo, se vienen buscando nuevos sistemas de visualización de información que permitan proporcionar al conductor datos relevantes durante el periodo de tiempo que pasa en carretera. Hecho acentuado por el incesante auge de las aplicaciones que ofrecen información distribuida bien mediante el uso de VANETs o de servicios centralizados en la ciudad, como, por ejemplo, el estado en tiempo real de las carreteras, las condiciones de la contaminación en ciudad por zonas, etc. Una posible solución al problema planteado surge con la aparición de los dispositivos de tipo Head-Up Display (HUDs) que permiten, mediante una pantalla transparente parecida a la que se utiliza en el mundo de la aviación, tener información superpuesta, bien en la propia luna del vehículo o bien sobre una pantalla transparente, durante el periodo de conducción pudiendo acceder a una mayor cantidad de información sin la necesidad de desatender la carretera apartando la atención de la misma.

Por todo ello, la principal contribución que presenta este capítulo se basa en la concepción de la idoneidad de este tipo de dispositivos para la representación de información dentro de una red vehicular o un entorno vehicular individual mediante la realización de una serie de análisis. En este caso se han propuesto dos estudios que vislumbran la necesidad de la incorporación de estos dispositivos en el parque móvil actual al incrementar la sensación de seguridad de los usuarios y pudiendo obtener una mayor cantidad de información en el vehículo. Por otro lado, el capítulo contribuye al desarrollo de nuevos métodos de interacción con este tipo de dispositivos, con el objetivo de disminuir las distracciones al volante y por tanto aumentar el nivel de seguridad en la conducción mediante las opiniones extraídas directamente de conductores y siempre empleando entornos reales de conducción con el objetivo de conseguir unos resultados lo más fiables posibles.

Dentro de los análisis, se abordaron temas relacionados con la visualización de información (sobre la interfaz concreta de las aplicaciones, colores, transparencia, etc.), con la usabilidad de este tipo de dispositivos abordando, tanto en la fase de incorporación

de HUDs en entornos vehiculares, como en la fase de interacción mediante comandos de voz. Además, también se prestó especial atención a temas relacionados con la seguridad en la conducción, siendo este último el principal objetivo del estudio realizado.

El resultado y conclusión más destacable dentro del capítulo es que la utilización de los dispositivos de representación de información de tipo HUD parece una vía adecuada para mostrar información a los conductores (limitada a la esencial y sin mucha dinamicidad en los cambios de los datos), obteniendo una mayor seguridad en la conducción que con el uso de dispositivos con pantalla convencional (HDD), y pudiendo generar beneficios tanto para el conductor como para su entorno.

Capítulo 6

6 Uso de Redes Vehiculares para la mejora de la Sostenibilidad Ambiental

La calidad del aire, sobre todo en las ciudades, es un problema muy grave debido al impacto directo que tiene sobre la salud humana y el calentamiento global. Desde hace tiempo, los gobiernos hacen intentos para poder medir y mitigar los efectos negativos que esto provoca, siendo insuficientes ya que, los niveles de contaminación en ciudad siguen creciendo continuamente.

Una vez desarrollados y discutidos a lo largo de esta Tesis Doctoral algunos servicios y aplicaciones que pueden mitigar, o por lo menos, reducir el nivel de contaminación localizada en el aire, el presente capítulo se centra en el estudio de las características de la medición mediante redes de vehículos y las formas de representación de la información que éstos recogen. Se pretende cuantificar los niveles de contaminación en ciudad y determinar cómo podemos representar tales valores para que los ciudadanos, eje fundamental dentro de una ciudad inteligente, sean capaces de interpretar los datos

correctamente. De esta forma, los usuarios pueden tomar decisiones en su vida cotidiana que puedan dar lugar a una mejora sustancial de la calidad del aire en ciudad.

6.1 Problemática Actual sobre Medición de Información Ambiental en Ciudad

Como vimos en capítulos anteriores, las redes móviles de vehículos pueden usarse para resolver algunos problemas relativos a la movilidad y gestión del tráfico, proponiendo y estudiando diferentes aplicaciones como la gestión de atascos, el aviso de colisiones o la creación de planes de movilidad en función de las condiciones actuales de la vía. A parte de este tipo de aplicaciones, las redes de vehículos móviles pueden tener un papel importante en la medición de la calidad del aire en ciudad, consiguiendo unas representaciones de contaminación más exactas que las actuales, que se basan en la recogida de datos ambientales en puntos concretos de la ciudad.

Cuando decidimos evaluar cómo se realizaba la medición de información ambiental en ciudad, nos encontramos con dos problemas principales. En primer lugar, surgió la duda de: ¿Cómo podemos medir la información ambiental de una ciudad para tener un mapa general de la contaminación localizada?, una vez solucionada esta cuestión y de forma consecutiva, surgió la siguiente pregunta: ¿Cómo podemos representar de forma correcta la información recogida para que los usuarios puedan interpretarla adecuadamente?

En 2012, nuestro grupo de investigación creó un sistema llamado “*Integrated Platform in Urban Vehicles for Air Quality Monitoring*” (UrVAMM) [146]. El proyecto UrVAMM propuso un método pionero para la monitorización del medioambiente haciendo uso de redes móviles de vehículos municipales (autobuses, recogida de residuos, etc.), mediante la integración de un sistema de monitorización de calidad ambiental llamado NanoEnvi y el sistema CATEDBOX [138]. NanoEnvi es una tecnología desarrollada por la empresa Ingenieros Asesores y que está formada por un conjunto de productos cuyo objetivo es controlar la calidad del aire. Por otro lado, CATEDBOX es un sistema desarrollado por la empresa ADN Mobile Solutions que da soporte a la conducción eficiente y que está basado en dispositivos Android que procesan la información capturada de los vehículos vía CAMBUS y transmiten la información a un sistema central. Gracias a la capacidad de CATEDBOX para poder actuar como un gestor de eventos, la tecnología NanoEnvi puede ser integrada de forma fácil en el sistema. Debido a ello, la información recogida por los sensores de calidad ambiental (NanoEnvi) puede ser transmitida sin software ni hardware adicional.

Fue en 2013, cuando el sistema UrVAMM fue desplegado experimentalmente en la ciudad de Oslo para proveer de información adicional sobre la contaminación ambiental en ciudad. Cuando el sistema empezó a recoger datos, el grupo de investigación se encontró con el problema de que se carecía de exactitud para representar la información recopilada al no encontrar un criterio predefinido para ello.

En la actualidad, muchos gobiernos e instituciones monitorizan la calidad ambiental con estaciones fijas donde los datos pueden ser representados a los ciudadanos como una evolución en una escala de tiempo, pero solo en posiciones concretas. La Figura 62 muestra un ejemplo de representación de la evolución del nivel de SO_2 localizado en un punto. Esta representación está basada en dos variables: tiempo (t) y nivel de polución en un punto específico (p), por lo que, cada valor individual tiene que ser representado como una tupla de datos (t, p). Estos valores pueden ser representados de diferentes formas, pero solo se obtienen en un lugar determinado y es muy difícil extrapolarlos a un mapa genérico de la ciudad con precisión, a pesar de que los mapas son herramientas de uso común para la publicación de información de contaminación del aire.

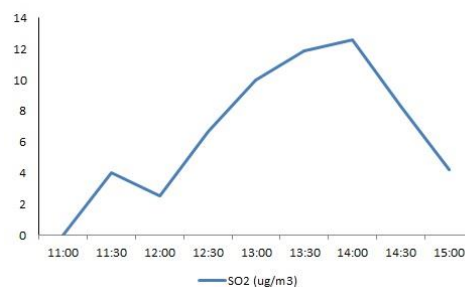


Figura 62. Nivel de SO_2 en un periodo de tiempo

Por otra parte, cuando empleamos redes de vehículos encargadas de la monitorización del medioambiente, hacemos que la representación de datos no se haga en función de simples gráficas en una escala de tiempo (al estar en una posición fija). En esta ocasión, los datos están definidos usando tres variables, que son: tiempo (t), nivel de contaminación (p) y localización física (x, y). Atendiendo a estas tres variables debemos conseguir realizar una representación adecuada y útil para los usuarios. La Figura 63 muestra un ejemplo de representación de información ambiental recogida en la ciudad de Gijón haciendo uso de la tecnología explicada anteriormente (NanoEnvi - CATEDBOX). Vemos como en la ruta por la que pasa el vehículo se hacen unas mediciones y los valores obtenidos se representan con distintos colores según el nivel de contaminación de la zona y así se caracteriza el área en función de la contaminación existente (recuadro rojo).

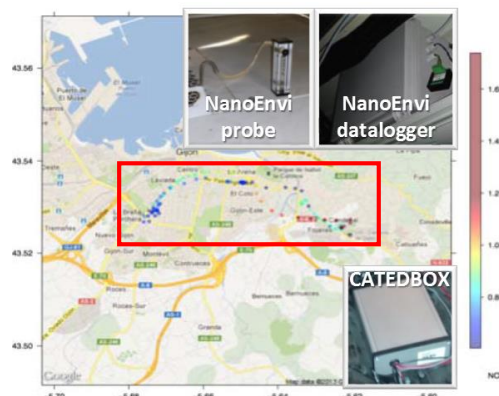


Figura 63. Representación de datos en Gijón (España) con tecnología NanoEnvi - CATEDBOX

Una vez vista la representación, y contextualizando la tarea de investigación al área de las ciudades inteligentes, donde sus habitantes son un pilar fundamental, se plantearon las siguientes dudas: ¿es una buena representación para los usuarios?, ¿incluye la información que los usuarios esperan encontrar?, ¿es fácil de interpretar?, ¿se puede mejorar? Una vez llegados a este punto, el objetivo propuesto fue el de responder a esas preguntas por lo que se decidió estudiar el tipo de representaciones más adecuadas para que los ciudadanos interpreten de forma correcta los datos medioambientales recogidos por redes de vehículos móviles.

6.2 Caso de Estudio sobre Sostenibilidad Ambiental en Ciudades - Representación de Información

Este caso de estudio presenta un trabajo conducido a determinar cómo la información ambiental recogida por redes de vehículos móviles debería ser representada con el objetivo de que los ciudadanos puedan interpretar de forma correcta dicha información y puedan actuar en consecuencia. En esta ocasión, se evaluarán diferentes métodos de representación ambiental dependiendo de la interpretación y comprensión de los usuarios. También se determina el tipo de dispositivo para acceder a este tipo de información, y finalmente, las preferencias de los usuarios teniendo en cuenta el uso del tipo de datos que se les podría proporcionar.

Un total de 110 usuarios participaron en este estudio obteniendo unos resultados que muestran la importancia de una representación adecuada de datos con el objetivo de conseguir una interpretación correcta de la información mostrada y destacando los posibles efectos que esto puede conllevar dentro de las redes VANET.

6.2.1. Descripción de los Experimentos

El análisis de elementos visuales mediante evaluaciones subjetivas no es un proceso aleatorio y debe ser diseñado e implementado siguiendo unos estándares y recomendaciones apropiados para que su desarrollo y resultado sean satisfactorios. Por este motivo, el presente apartado se centra en la descripción de los aspectos metodológicos empleados, las fuentes de las que se extrajeron los datos ambientales y la plataforma completa de experimentación desarrollada para la realización de los ensayos.

6.2.1.1. Aspectos Metodológicos

Desde hace tiempo, el ITU-T (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones) hace una serie de recomendaciones basadas en diferentes metodologías diseñadas para realizar evaluaciones subjetivas. Estas metodologías pueden llegar a clasificarse en función del tipo de experimento. En nuestro caso, hemos adaptado estos procedimientos a los materiales a utilizar en referencia a la calidad de imagen [147], a los estudios acerca de la unificación de metodologías de evaluación de imágenes [148] y a las metodologías para la realización de pruebas subjetivas en lo referente a imágenes de televisión [149].

El experimento realizado consiste en una única sesión en la que preguntábamos a los usuarios un conjunto de cuestiones. Cada prueba empezaba con una breve explicación oral apoyada en unas pocas diapositivas acerca del proyecto, los tipos de cuestiones que debía responder y la aplicación mediante la que se desarrollaba el experimento para poder realizar las evaluaciones. Además, se atendió a la contextualización del problema explicado en el apartado 6.1 del presente documento. A continuación, cada usuario se quedaba solo en una habitación con el ordenador en el que se ejecutaba una aplicación de escritorio desarrollada para realizar las evaluaciones subjetivas. Este software funcionaba en modo de pantalla completa dividiendo la información mostrada en 8 fases diferentes (Tabla 34).

Fase	Nombre de Fase	Objetivo de Fase
1	Datos de Usuario	Conocer las características de los usuarios: nombre, edad, mail, nivel de estudios, etc.
2	Test de Ishihara	Prueba de visión de color para la detección de deficiencias visuales
3	Preguntas relacionadas con medioambiente	Conocer el interés de los usuarios en temas ambientales
4	Clasificación de Mapas y pregunta de interpretación	Clasificar las representaciones de mapas
5	Clasificación de Gráficas y pregunta de interpretación	Clasificar las representaciones de gráficas
6	Clasificación de Indicadores y pregunta de interpretación	Clasificar las representaciones de indicadores
7	Tipo de Pantalla	Conocer el mejor dispositivo para las diferentes representaciones (mapas, gráficas e indicadores)
8	Tipo de Datos	Conocer las preferencias del usuario en lo referente al tipo de datos (histórico y tiempo real)

Tabla 34. Fases de la evaluación subjetiva

Haciendo referencia de nuevo a la Tabla 34, vemos como en primer lugar recopilábamos información general del usuario: su nombre, correo electrónico, edad, género, nivel de inglés (algunas imágenes contienen información en inglés) y tipos de dispositivos que usa habitualmente (PC, Smartphone, Tablet y/o Smart TV). A continuación, se realizaba un *Test de Ishihara*, destinado a detectar posibles dificultades en la interpretación de los colores. Esta prueba era importante, debido a que la evaluación subjetiva que van a realizar los usuarios está basada en la visualización de imágenes con diferentes colores que implican la necesidad de una interpretación correcta del color. En una tercera fase, pedimos información relativa al medioambiente, que nos permitía clasificar a los participantes en los siguientes grupos: usuarios expertos en medioambiente, usuarios con algún conocimiento en medioambiente y usuarios sin ningún conocimiento en temas ambientales. Para determinar el perfil de un participante, se describían un conjunto de preguntas de elección múltiple con cuatro respuestas sobre el nivel de conocimiento e interés en temas medioambientales.

Las fases 4, 5 y 6 se usaban para clasificar las categorías de representación a evaluar, en nuestro caso: mapas, gráficas e indicadores. En esta ocasión, atendimos a diferentes imágenes, extraídas de algunos estudios dedicados a la representación de datos de contaminación ambiental en ciudad que representan distintos métodos para representar la información. Todas las capturas de cada una de las categorías se presentaban en una pantalla simple, donde cada usuario debía clasificar las imágenes usando un valor numérico desde 1 (mejor) hasta 5 o 6 (peor), dependiendo de la categorización (ranking) del tipo de representación preferida por el usuario. La Figura 64 muestra un ejemplo de la aplicación corriendo en el caso de la categorización de mapas.

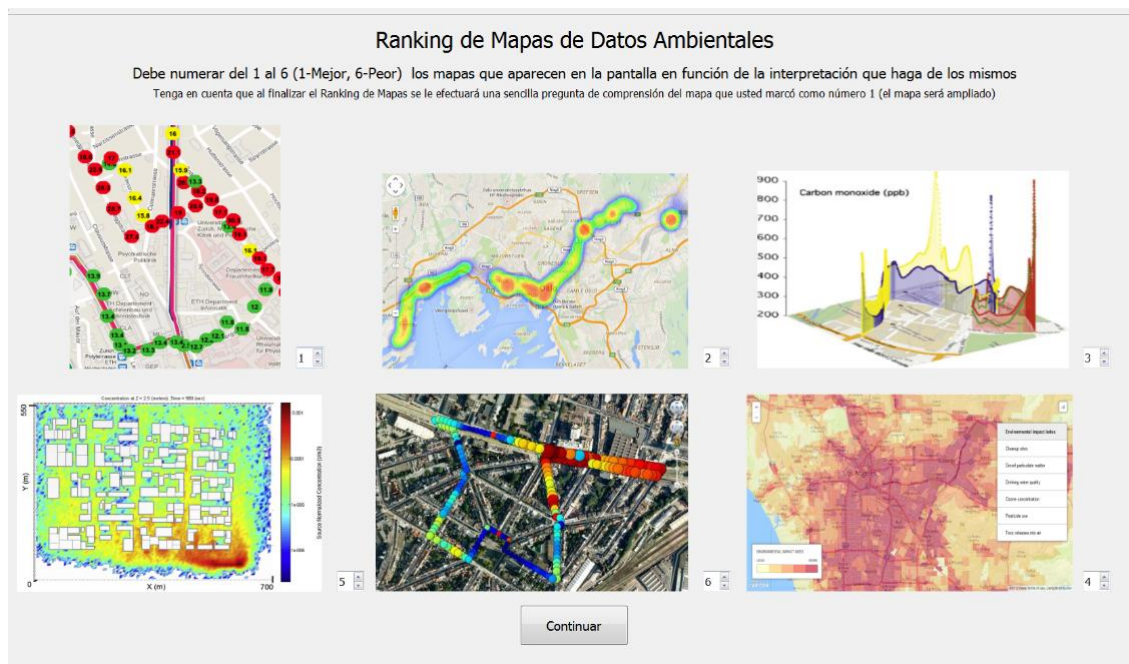


Figura 64. Aplicación corriendo con la categorización de representaciones basadas en mapas

Para verificar que el usuario comprende el contenido de la imagen mejor valorada, la siguiente pantalla se utilizó para plantear una pregunta diseñada específicamente para ella. Como consecuencia, se diseñó una cuestión específica para cada una de las representaciones que se utilizaban en la prueba. Finalmente, las dos últimas fases (7 y 8) nos permitieron conocer las preferencias del usuario en cuanto al tipo de dispositivo a emplear para cada una de las categorías anteriores (mapas, gráficas e indicadores) y también el interés en los diferentes tipos de datos (históricos o en tiempo real), para lo cual se empleaban diferentes preguntas de elección múltiple.

El tiempo completo para realizar la experimentación en su totalidad fue aproximadamente de 10 minutos. Tras la finalización de la misma, se enviaba un correo electrónico al usuario que contenía un enlace a una encuesta final de satisfacción respecto a la prueba realizada.

Por todo lo explicado anteriormente, podemos proponer los objetivos principales en los que se fundamenta este estudio y que serán desarrollados en el apartado de resultados de forma extensa:

- **Objetivo 1 - Representación de Mapas:** Atendiendo a 6 mapas para su clasificación. Esto nos permitía conocer la representación más adecuada para cada grupo de usuarios. Este objetivo está cubierto por la fase 4 de la evaluación.
- **Objetivo 2 - Representación de Gráficas:** Se presentan 6 gráficas para su posterior clasificación. El objetivo actual era el de descubrir la mejor representación para cada grupo de usuarios. La fase 5 cubre este objetivo.
- **Objetivo 3 - Representación de Indicadores:** En esta ocasión se presentan 5 indicadores para su posterior clasificación. Esto nos permitía conocer cuál es el mejor indicador para los diferentes usuarios. La fase 6 fue la encargada de cubrir este objetivo.
- **Objetivo 4 - Elección de Dispositivo:** Obtenemos información relevante acerca del dispositivo más adecuado para mostrar las evaluaciones cubiertas mediante los objetivos 1, 2 y 3. Este objetivo era cubierto por la fase 7 del experimento.
- **Objetivo 5 - Tipos de Datos Ambientales:** En este caso se pretendía determinar la importancia de dos tipos de datos para cada grupo de usuarios: Datos históricos y Datos en tiempo real. La fase 8 es la encargada de cubrir este objetivo.

6.2.1.2. Fuentes de Datos Ambientales

Para poder elegir de forma correcta y variada las representaciones a evaluar, se llevó a cabo un completo análisis de trabajos relacionados con el tema propuesto. En este contexto, se buscaron diversos tipos de representación de datos, susceptibles de ser utilizados en un sistema móvil de monitorización medioambiental.

La Figura 65 muestra los diferentes mapas considerados en nuestra investigación. Vienen identificados con la letra “M” (Mapa) y un número, siendo citados a lo largo del resto del artículo siguiendo esta parametrización. Básicamente encontramos dos estilos de construcción de mapas para mostrar datos ambientales. Algunos trabajos previos pintan puntos sobre el plano y otros, áreas de diferentes colores y formas. Todos ellos suelen utilizar códigos de colores para representar el nivel de contaminación, variando en algunos casos, el rango de tonalidades. En esta ocasión, algunos trabajos reflejan

información instantánea y otros hacen uso de diferentes algoritmos para calcular el nivel de contaminación de un área completa.

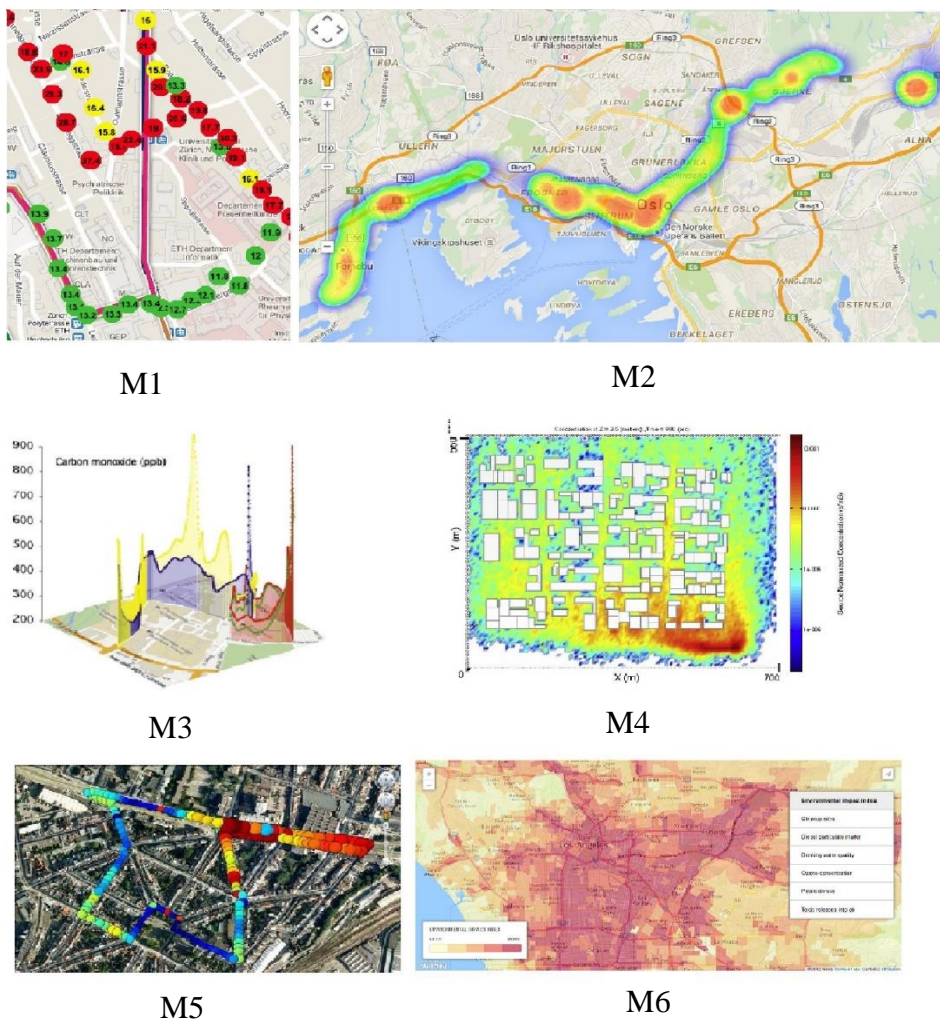


Figura 65. Mapas propuestos

La Figura 65 - M1 [150], es un ejemplo de mapa en el que se usan puntos de diferentes colores con el objetivo de representar los distintos niveles de polución en la ciudad. En cada uno de ellos, aparece el nivel de contaminación en un momento de tiempo concreto. Caso similar al planteado en la Figura 65 - M5 [151], donde se usa un mapa con cada punto calculado haciendo una agregación espaciotemporal de algunas medidas. En esta ocasión, se representan puntos cada 10 metros y hacen uso de un algoritmo para calcular las concentraciones de contaminación en el aire que existen entre ellos.

Por otro lado, la Figura 65 - M2 [152], es un claro ejemplo de representación basado en mapas de calor. Para ello, se colorean en función de un rango de colores, áreas completas en vez de utilizar puntos determinados. Los autores usan la información

recolectada para calcular el color de una nube que representa el nivel de contaminación en un área determinada. Algo similar ocurre con el mapa presentado en la Figura 65 - M4 [153] donde se muestra la contaminación de un área con un código de color que representa el nivel de contaminación (rojo-naranja-amarillo-azul-verde) explicado en una leyenda lateral y situando los puntos coloreados en un plano superpuesto de la ciudad en la que aparecen incluso los bloques de los edificios. De igual forma, la Figura 65 - M6 [154], marca la zona de una ciudad completa con un código de color que representa distintos niveles de contaminación y mostrando de nuevo, en la parte inferior, una leyenda con el significado de la coloración del mismo.

Por último, podemos observar en la Figura 65 - M3 [155] la creación de un mapa usando un modelo en tres dimensiones (3D). Este plano muestra las rutas y calles completas en las que se realizaba una medición de nivel de contaminación en un momento concreto, representando el nivel de polución de cada una de ellas.

En lo referente a la representación de gráficas, la Figura 66 muestra todos los tipos de gráficas que se consideraron en el estudio. En este caso, hemos utilizado la letra “G” (Gráfica) y un número para identificar cada una de ellas. Como podemos observar, existen representaciones variadas, intentando abarcar la mayoría de posibilidades existentes a la hora de reflejar información ambiental que puedan otorgar a los usuarios información útil sobre los datos medidos en relación a la calidad del aire en ciudad.

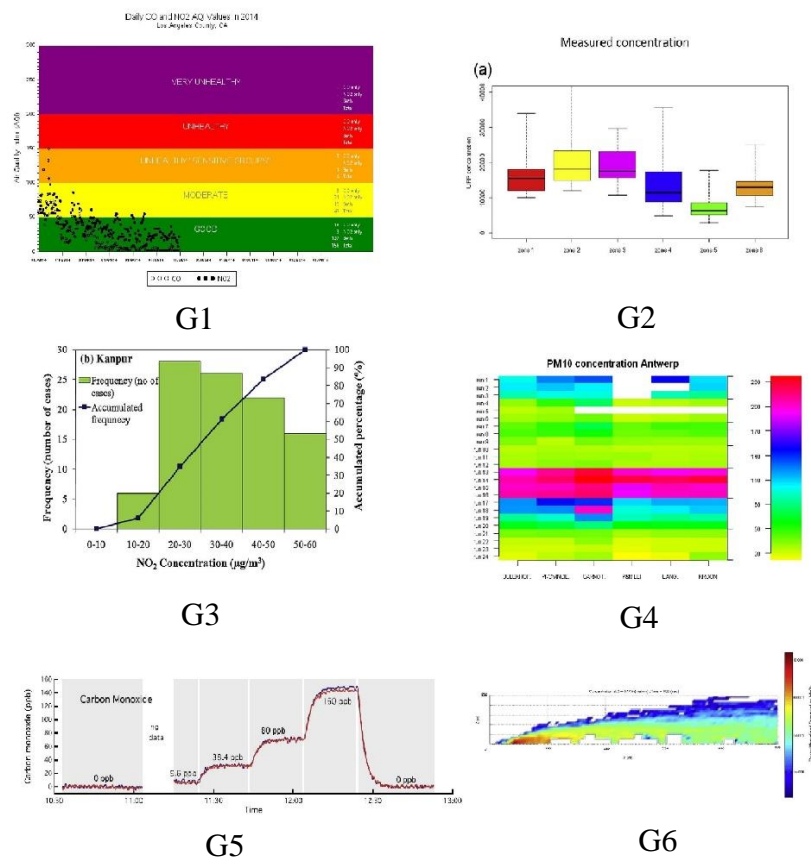


Figura 66. Gráficas propuestas

Algunos trabajos que siguen un enfoque tradicional para mostrar información sobre una gráfica, utilizan diferentes tipos de visualizaciones como gráficas lineales, de barras, de caja, de dispersión o una combinación de ellas. Sin embargo, existen otros estudios que diseñan nuevas formas de representación de la información medioambiental. Un ejemplo de trabajo que sigue un enfoque tradicional de representación es el caso de la Figura 66 - G1 del proyecto AQI PLOT [156]. Los autores se decantaron por un gráfico de dispersión para mostrar la evolución de los valores de dos partículas en el eje y, en función de una escala de tiempo en el eje x, pudiendo seleccionar una ciudad determinada. Adicionalmente, en el fondo de la representación se muestra un color que refleja el nivel de contaminación y una breve explicación del mismo.

Por otro lado, la Figura 66 - G2 [157] muestra el uso de un diagrama de caja para representar los niveles de polución en diferentes áreas de la ciudad. Por otro lado, la Figura 66 - G3 [158] utiliza un simple gráfico de línea sobre uno de barras para mostrar las concentraciones de nivel de NO₂ encontrado en la ciudad. En las representaciones utilizadas se muestra también la frecuencia y el porcentaje acumulado de contaminación.

La Figura 66 - G5 [155] plasma una simple gráfica donde se muestra una línea con la evolución del monóxido de carbono (eje y) en un periodo de tiempo (eje x). Por otro lado, la Figura 66 - G4 y la Figura 66 - G6 reflejan un sistema novedoso para mostrar datos medioambientales sobre gráficas. En la Figura 66 - G4 se observa una gráfica de colores en la cual se pueden visualizar las concentraciones medias de UFP (Partículas Ultrafinas) y PM10 (Partículas de Materia con diámetro de 10 micrómetros o menos). El eje y representa la diferentes rutas recorridas y el eje x las calles de la ciudad por las que se ha detectado esa contaminación. Al igual que este caso, la Figura 66 - G6 [153] muestra una representación vertical de los niveles de polución (eje y) en una parte de un área geográfica (eje x). De nuevo la escala de color representa el nivel de contaminación encontrado.

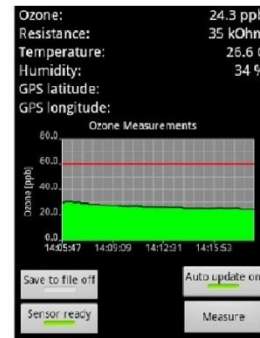
Atendiendo al último tipo de representación considerada en nuestra investigación, la Figura 67 refleja un conjunto de indicadores que pueden ser utilizados para mostrar el valor de una determinada variable o variables en un momento dado, así como el nivel de contaminación. De nuevo atendemos a la identificación mediante la letra "I" (Identificador) y un número. Al igual que en el resto de representaciones, hemos elegido varios indicadores disponibles en trabajos relacionados.

Los indicadores suelen utilizarse generalmente para representar información de contaminación en dispositivos pequeños como teléfonos inteligentes debido al tamaño de su pantalla. En nuestro caso, dos de los indicadores se han obtenido de la misma fuente [159]. Por un lado, la Figura 67 - I4 muestra una representación simple que consiste en un valor numérico que determina el nivel de contaminación de cierta partícula, acompañado de la calidad del aire expresada mediante una escala de colores y una palabra que determina cómo es la calidad del aire. Por otro lado, en la Figura 67 - I1 se mezclan un conjunto de valores de datos ambientales con un pequeño gráfico de líneas que expone la evolución de una determinada partícula. Del mismo modo, la

Figura 67 - I5 [160] muestra el valor cuantitativo de la exposición al ruido y un pequeño gráfico de líneas con la evolución de este valor en un tiempo pasado. Además, la Figura 67 - I2 [150] muestra un conjunto de datos fundamentales de contaminación y una gráfica más compleja con información histórica. Por último, la Figura 67 - I3 [161], propone un indicador simple que nos dice cómo es la calidad del aire en ciudad basándose en el uso de los siguientes parámetros: Buena, Moderada o Peligrosa. En este caso, también se informa sobre el valor de AQI (Índice de Calidad del Aire) en las últimas 24 horas.



I1



I2



I3



I4



I5

Figura 67. Indicadores propuestos

Merece la pena mencionar que cada uno de los mapas, gráficas e indicadores pueden ser utilizados para representar diferentes datos medioambientales, incluyendo mediciones de diversos tipos de partículas (NO, CO, PM, O3, AQI, etc.), independientemente de las medidas mostradas en las figuras, así como su evolución.

6.2.1.3. Plataforma de Experimentación

Para llevar a cabo las evaluaciones, se utilizó un ordenador de alto rendimiento y una pantalla de alta calidad. Los detalles del equipo y de la pantalla usados en los experimentos se muestran en las Tablas 35 y 36 respectivamente.

Componente	Especificaciones
Placa Base	ASUS P8H61-M LE-USB3
Procesador	Intel Core i7-2600 CPU@3.40GHz
Memoria RAM	8 GB DDR3
Tarjeta Gráfica	ATI HD6570 1GB DDR PCI-E PowerColour
SSD	128 GB Series 830 notebook Kit Samsung
Sistema Operativo	Windows 7 Home Premium 64-bits
Teclado	DELL SK-8115
Ratón	Rainbow

Tabla 35. Detalles del hardware empleado

Característica	Especificaciones
Monitor	LCD Philips led model 236V3L
Tamaño Diagonal	23 pulgadas
Resolución	1920x1080 (Full HD)
Ratio de Contraste Dinámico	5000000:1
Tiempo de Respuesta	5 milisegundos
Interfaz	D-Sub, DVI & HDMI
Ángulo de Visión	170/160°

Tabla 36. Detalles del monitor empleado

El ordenador ejecutaba una versión de 64 bits de Microsoft Windows 7 que lanzaba la aplicación de pruebas en modo de pantalla completa, donde los usuarios iban a hacer la evaluación subjetiva.

La aplicación se desarrolló en lenguaje C++, haciendo uso de la API de Qt para crear la interfaz de usuario utilizando QtCreator. La apariencia de la aplicación sigue las recomendaciones del ITU-T para este tipo de experimentos [149]. La Figura 68 muestra una captura de pantalla de la aplicación corriendo. En este caso, se está realizando la pregunta de interpretación de datos después de que el usuario haya seleccionado el gráfico de la Figura 66 - G4 como la mejor de su categoría.

Básicamente, la aplicación consiste en una secuencia de pantallas y que contienen diferentes formularios siguiendo la estructura descrita en las fases explicadas en la sección 6.2.1.1 del presente documento. Cuando la prueba llega a su fin, la aplicación almacena toda la información en un fichero local en formato CSV para su posterior análisis.

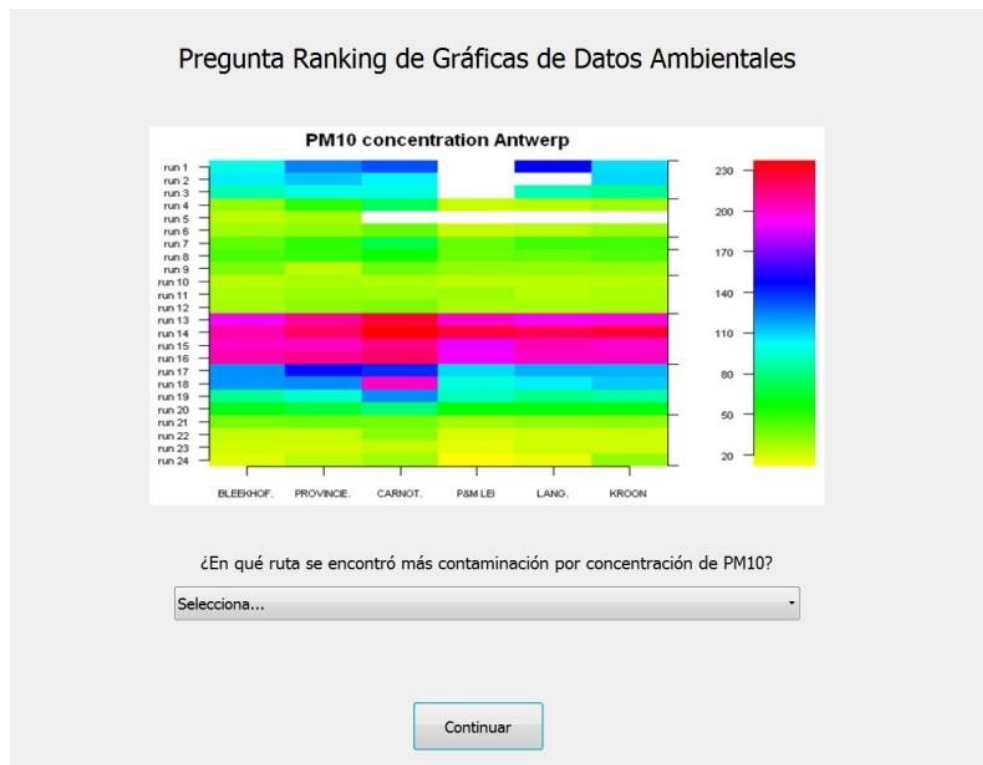


Figura 68. Captura de pantalla de la aplicación con pregunta de interpretación de gráficas

El equipo completo de experimentación estaba localizado en un despacho privado con baja iluminación (70-100 lx), dentro de los límites que son sugeridos por el ITU [162]. La distancia de los participantes al monitor es de aproximadamente un metro, valor que recomienda el fabricante de la pantalla.

6.2.1.4. Población

En la realización de las pruebas participaron un total de 110 usuarios de los cuales 54 de ellos eran hombres y 56 mujeres, es decir, un 49,09% y 50,91% respectivamente. El rango de edad de los participantes se encontraba entre los 19 y los 64 años, con una media de edad de 40,32 años y una desviación estándar de 12,53. En nuestro estudio sólo consideramos dos grupos de usuarios en lo referente a términos de edad: Menor o igual a 40 (47,27% de la población) y resto de usuarios.

Mediante el Test de Ishihara detectamos dos usuarios con algunos problemas visuales que no fueron excluidos del estudio, ya que este tipo de participantes también podría hacer uso de las visualizaciones representadas.

Cuando analizamos la población haciendo referencia al uso de dispositivos que utilizan de forma habitual, encontramos que el dispositivo más popular entre los usuarios es el ordenador personal, haciendo uso de él el 97,27% de ellos, seguido por el teléfono inteligente (86,36%), la Tablet (56,36%) y por último la televisión inteligente - Smart TV (12,73%).

Cuando analizamos a la población en referencia al nivel de conocimientos sobre temas medioambientales, los usuarios quedaban clasificados como sigue: usuarios profesionales 16,36%, usuarios con algún tipo de conocimiento en medioambiente 52,72% y usuarios sin conocimientos en la materia 30,92%. Por otro lado, el 35,45% de los usuarios contaban con un perfil técnico, siendo el mismo porcentaje el encontrado para usuarios con perfil científico. El porcentaje de usuarios con perfil humanístico era del 13,65%, siendo del 15,45% aquellos usuarios que se consideraban de perfil distinto a los descritos.

6.2.2. Análisis de Resultados y Discusión

Una vez obtenidos los datos de las evaluaciones subjetivas en un fichero con formato CSV, se procesaban haciendo uso del software Microsoft Excel, para obtener los resultados del estudio. Se realizaron diferentes análisis estadísticos utilizando las pruebas más comunes para este tipo de evaluaciones y que dependen de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Para cada uno de los objetivos expresados en la sección 6.2.1.1, se comprobó la normalidad con el test de *Saphiro-Wilk* y la homocedasticidad con el test de *Barlett*. Cuando los datos eran validados por ambos tests (cumplían con la condición de muestra normal y homocedástica) se realizaba un test *t de Student* con un coeficiente de confianza del 95% (α -value = 0,05). Cuando la condición de homocedasticidad fallaba, utilizábamos el test de *Kruskal-Wallis*.

6.2.2.1. Objetivo 1: Representación de Mapas

Cuando nos referimos a la selección de los mapas más adecuados para la representación de este tipo de información, vemos claramente como el plano más popular entre los usuarios es el M2 (Figura 65 - M2), clasificado en la primera posición por corresponder a la elección de un 38,18% de los usuarios, seguido del mapa M1 con un 32,73%. El resto de opciones fueron valorados en posiciones más bajas durante todo el ensayo, por lo que centraremos el análisis en los 2 que fueron destacados por los participantes. Comparando los dos mapas, con la finalidad de determinar cuál era más popular se estableció un análisis en el que se detectaron diferencias significativas entre ambos, obteniendo un p -value < 0.02, por lo que podemos concluir que el mejor mapa para la representación de datos ambientales es el M2.

Considerando los diferentes grupos de usuarios en los que ha sido dividida nuestra población, encontramos también diferencias significativas entre la naturaleza del conjunto y los mapas seleccionados. En la Figura 69, podemos observar el porcentaje de usuarios por edad, viendo cómo de nuevo los mapas más valorados son M1 y M2. A pesar de ello, podemos observar que, dependiendo del grupo, el mapa elegido varía entre M1 y M2 ya que la mayoría de usuarios del grupo de >40 años piensan que la mejor representación es M1 (37,93%), mientras que el 44,23% de usuarios del grupo de <=40 años, creen que el mejor mapa es el M2. Estudiando si existen diferencias significativas entre ambos grupos podemos determinar que en el grupo de <= 40 años, si se encuentran entre la elección de M1 y M2 (p -value < 0.01), indicando que M2 la mejor alternativa. Atendiendo al otro grupo (>40), podemos observar como la

preferencia sobre estos dos mapas es M1, sin que existan diferencias reseñables entre sus elecciones.

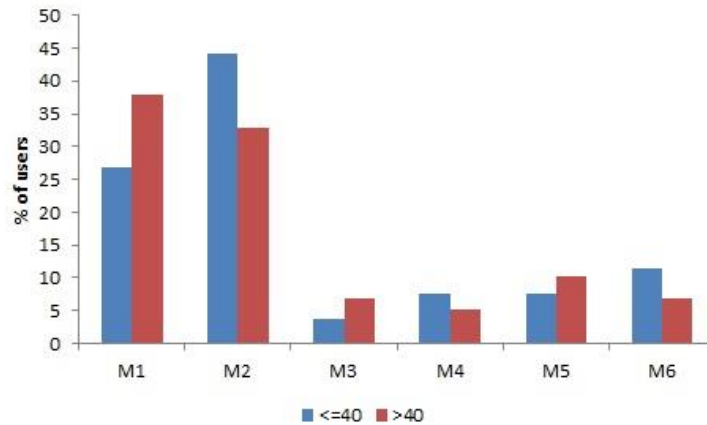


Figura 69. Selección de mapa por grupos de usuarios en función de la edad

Teniendo en cuenta la división de grupos de usuarios en función del nivel de conocimiento sobre temas ambientales, podemos observar los resultados que muestra la Figura 70.

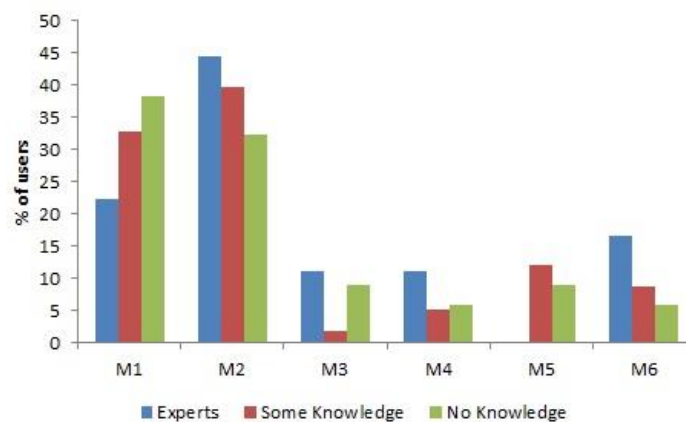


Figura 70. Selección de mapa por grupos de usuarios en función del conocimiento en medioambiente

En este caso, el eje y representa el porcentaje de usuarios de cada grupo y el eje x los mapas. Podemos denotar la existencia de ligeras diferencias entre los grupos dependiendo de los mapas seleccionados. Los expertos en medioambiente y los usuarios con algún conocimiento sobre el tema prefieren el mapa M2 con un 44,45% y un 39,65% respectivamente. Sin embargo, las personas que no tienen conocimientos sobre temas relacionados con el medioambiente prefieren el mapa M1 (38,23%). Analizando los datos en detalle podemos concluir que existen diferencias relevantes en el grupo de los expertos ($p\text{-value} < 0,03$), siendo M2 el mapa más popular. Por otro lado, y a pesar

de las ligeras diferencias encontradas en el resto de agrupaciones, no detectamos ninguna significativa entre los mapas M1 y M2.

Por último, si consideramos los diferentes perfiles de los participantes obtenemos los datos recogidos en la Figura 71. De nuevo, el eje y representa el porcentaje de usuarios de cada grupo, quedando el eje x para la determinación del mapa correspondiente. Como podemos observar, el mapa M2 es la mejor opción para los usuarios clasificados en los grupos “Técnico” y “Científico” con un 43,59% y 39,46% respectivamente. Por otro lado, el mapa M1 es el más popular para los usuarios de perfil “Humanístico” y “Otros...” (60% y 47,06% respectivamente). Analizando los datos en detalle, encontramos diferencias relevantes en el grupo con perfil “Técnico” ($p\text{-value} < 0,02$), siendo el mapa M2 el mapa más popular para sus miembros. Por otra parte, analizando los restantes grupos (Humanístico, Científico y Otros...) no encontramos diferencias significativas entre los mapas M1 y M2.

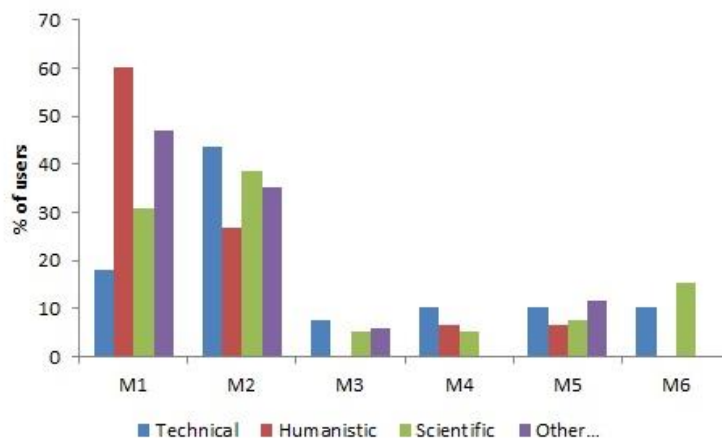


Figura 71. Selección de mapa por grupos de usuarios en función del perfil

6.2.2.2. Objetivo 2: Representación de Gráficas

Atendiendo a la selección de la representación más adecuada de gráficas, encontramos que las más valoradas fueron las G1 y G5 (Figura 66 - G1 y Figura 66 - G5) por el 46,36% y el 30% de los usuarios respectivamente, aunque no se encontraron diferencias significativas entre ellas.

En la Figura 72 se muestran los resultados obtenidos por los usuarios en función de su perfil. Como podemos observar, la gráfica G1 es la más popular en todos los grupos excepto en el “Humanístico”, en el que los resultados valoran por igual ambas gráficas (G1 y G5) con un 33% de los usuarios, sin encontrar claras diferencias entre ambas selecciones.

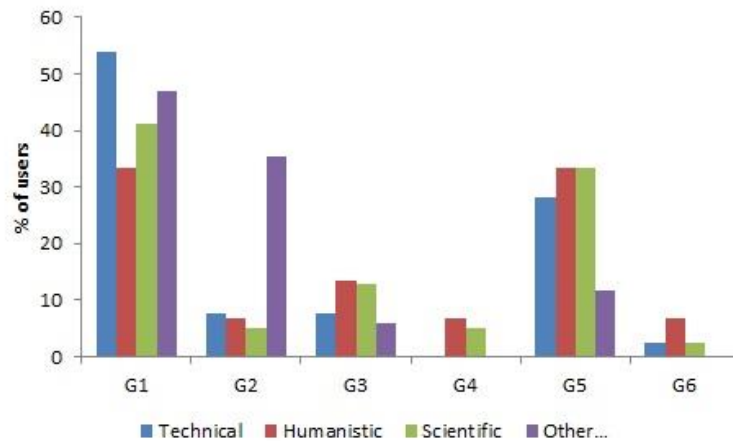


Figura 72. Selección de gráfica por grupos de usuarios en función del perfil

Otro factor interesante en el análisis tomando los grupos de usuarios en función al perfil es que ninguno de los usuarios del grupo “Otro...” eligió la gráfica G4 ni la G6. Algo parecido ocurría con los usuarios con perfil “Técnico” basándose en la selección de la gráfica G4.

Por último, podemos determinar que no existen diferencias significativas cuando hacemos el estudio en función del grupo de edad o del nivel de conocimiento de temas relacionados con el medioambiente, siendo las gráficas más valoradas por los usuarios las gráficas G1 y G5.

6.2.2.3. Objetivo 3: Representación de Indicadores Ambientales

Haciendo referencia a la representación de indicadores, observamos cómo el identificador más popular entre los usuarios fue el I4 (Figura 67 - I4), siendo elegido por un 42,72% de los usuarios, seguido del I1 con un 35,45%. Pese a las diferencias detectadas, no encontramos valores estadísticos significativos entre ellos.

Cuando realizamos el análisis de los diferentes grupos de usuarios por perfil obtenemos los resultados que se muestran en la Figura 73, donde se puede observar que el indicador I4 es el más popular para todos los grupos excepto para el denominado como “Otro...”, teniendo una opinión idéntica para los identificadores más populares (I1 e I4) de un 41,18%, sin encontrar diferencias significativas entre ellos.

Además de lo mencionado anteriormente, encontramos que ninguno de los usuarios del grupo “Otro...” seleccionó los indicadores I3 e I5, ocurriendo algo similar con los participantes del grupo “Científico” dentro de la elección del indicador I5.

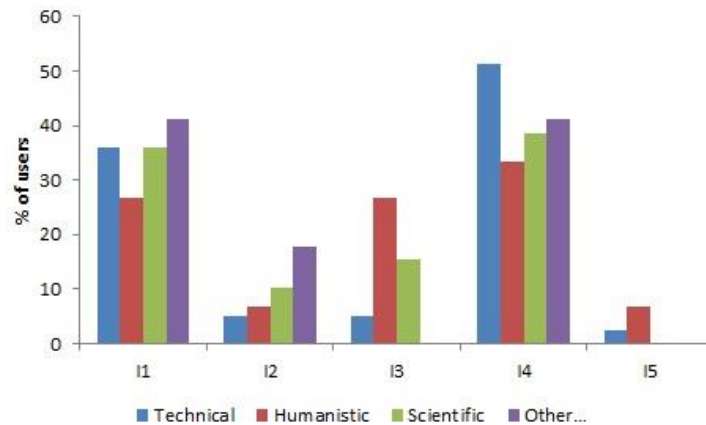


Figura 73. Selección de indicador por grupos de usuarios en función del perfil

Por último, merece la pena mencionar que no se detectaron diferencias significativas entre la elección de indicadores cuando analizábamos los grupos en función de la edad y del nivel de conocimiento en materia medioambiental, siendo en ambos casos los indicadores más populares los mencionados al comienzo (I1 e I4).

6.2.2.4. Objetivo 4: Elección de Dispositivo de Representación

Una vez evaluadas las preferencias de la representación de datos tanto en mapas, gráficas e indicadores, atendemos a los datos recogidos para evaluar las preferencias en referencia al tipo de dispositivo destinados a representar la información. En este caso, la Figura 74 muestra los resultados del total de la población, teniendo en el eje y el porcentaje de aceptación de los usuarios que usan cada uno de los dispositivos propuestos los cuales se encuentran en el eje x para la representación de la información recogida en los Objetivos 1, 2 y 3.

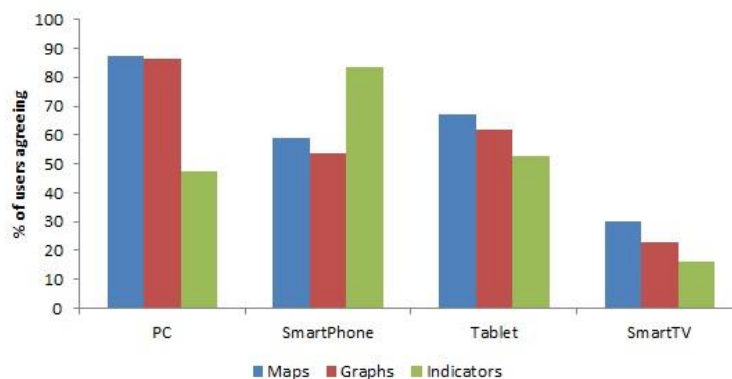


Figura 74. Selección de dispositivo por categoría de representación

En general podemos observar como el ordenador personal es el dispositivo más recurrido para acceder a información ambiental representada mediante mapas y gráficas, teniendo un total del 87,27% y 86,36% respectivamente mientras que en el caso de los

indicadores el dispositivo más apropiado para su visualización sería el teléfono móvil (Smartphone) con un 83,64% de los usuarios. En este análisis, los participantes evidenciaron que los indicadores eran más adecuados para este tipo de dispositivo por el tamaño reducido de la pantalla. La aceptación de la televisión inteligente (Smart TV) fue la menos valorada, debido a que sólo un 12,73% de la población total están familiarizados con su uso.

Considerando los diferentes grupos de usuarios por separado, encontramos las mismas conclusiones que para los mapas y las gráficas. Sin embargo, en el caso de los indicadores encontramos leves diferencias. Los teléfonos inteligentes se postulan como la mejor solución de representación para usuarios pertenecientes a los grupos con perfiles “Científico” y “Técnico” cambiando esta selección a los ordenadores personales en los grupos “Humanístico” y “Otro...”.

No se encontraron diferencias significativas entre los tipos de dispositivo cuando se realizaba el análisis por grupos de edad o niveles de conocimiento en medioambiente. Teniendo en ambos casos una preferencia clara en la selección del ordenador personal para visualizar información referente a mapas y gráficas y los teléfonos inteligentes para poder ver indicadores.

6.2.2.5. Objetivo 5: Preferencia de Tipo de Datos Medioambientales

Cuando hablamos sobre la preferencia del tipo de datos medioambientales que prefieren los usuarios encontramos, que la gran mayoría de participantes se decantan por información en tiempo real frente a la información ambiental histórica. De hecho, al realizar en análisis en profundidad nos dimos cuenta de que existen diferencias significativas entre ambos tipos de información ($p\text{-value} < 0,01$).

La Figura 75 muestra los resultados de esta parte del análisis cuando agrupamos los usuarios por nivel de conocimiento en medioambiente, siendo el eje y el encargado de determinar las puntuaciones medias normalizadas para cada grupo de usuarios y el eje x para detallar el tipo de información.

En este caso, podemos ver cómo los expertos en medioambiente consideran muy importantes los dos tipos de datos presentados, pero aparentemente, prefieren la información histórica a la información en tiempo real para poder realizar análisis a posteriori. Con este resultado queda constancia de que los datos históricos son una de las principales fuentes de información necesarias para llevar a cabo sus investigaciones y estudios, aunque no encontramos diferencias significativas entre las selecciones realizadas en este colectivo.

En el caso de los usuarios con algún conocimiento en medioambiente y usuarios sin ningún conocimiento, la información preferida es la ofrecida en tiempo real, existiendo diferencias significativas entre ambos tipos de datos para ambos con un $p\text{-value} < 0,01$. A la vista de estos resultados podemos concluir que la mejor opción es mostrar siempre

información en tiempo real y permitir a los usuarios acceder a datos históricos como una opción secundaria.

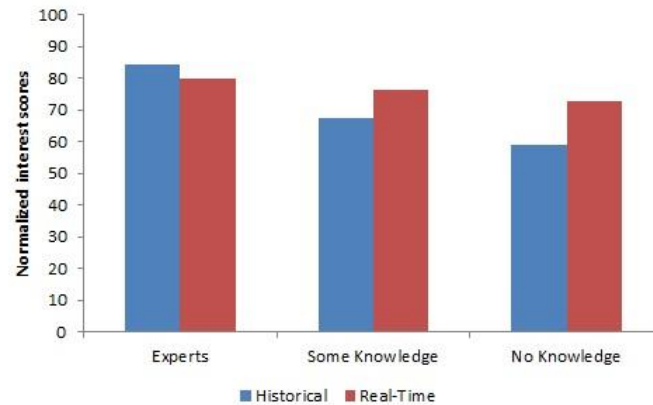


Figura 75. Tipo de datos para grupos de usuarios en función del nivel de conocimiento en medioambiente

Por último, podemos afirmar que no existen diferencias significativas entre los diferentes grupos de participantes cuando son divididos por edad o por los diferentes perfiles planteados, donde en ambos casos, los datos en tiempo real son los preferidos.

6.2.3. Conclusiones

Ante la dificultad encontrada en la representación de información ambiental que actualmente se recoge en ciudad, se propuso la opción del uso de redes de monitorización móvil (vehículos) para identificar las zonas más afectadas por estos efectos. Tras realizar un estudio previo, el grupo de investigación se dio cuenta de que no había ningún criterio para representar información ambiental recogida por este tipo de redes y decidió realizar este estudio que presenta una extensa evaluación subjetiva realizada con una población total de 110 usuarios y que cumple con todos los objetivos planteados inicialmente. Mediante el análisis desarrollado, se ha localizado la mejor representación de datos ambientales recogidos por redes vehiculares móviles, el tipo de dispositivo adecuado para la representación de estos y los intereses de los usuarios en relación al tipo de datos a representar.

Como principal conclusión, los usuarios prefieren una representación limpia y clara enfocada a mostrar un conjunto reducido de información. En el caso de la representación sobre mapas (Objetivo 1), los participantes eligieron un mapa simple con una representación de colores en un área geográfica, quedando reflejado el nivel de contaminación mediante una escala de color que va desde rojo (alta contaminación) hasta verde (baja contaminación). Atendiendo al caso de la representación de gráficas (Objetivo 2), identificamos claramente cómo los usuarios seleccionaron un gráfico sencillo de dispersión que muestra los valores de un indicador en una escala de tiempo. Esta elección también incorporaba un fondo que muestra los diferentes niveles de contaminación haciendo, de esta forma, que el gráfico sea más intuitivo de entender ya que los usuarios son conscientes del peligro a primera vista. Para el último caso de

representación, los indicadores (Objetivo 3) podemos concluir que los usuarios seleccionaron un identificador numérico simple con una nube de color como fondo. Al igual que en el caso de la selección de gráfica, el color de la nube ayuda al usuario a identificar rápidamente el nivel de contaminación sin necesidad de un conocimiento previo. En este tipo de indicadores también se puede leer una pequeña palabra que describe el nivel.

Teniendo en cuenta el tipo de dispositivo preferido por los usuarios para las distintas representaciones (Objetivo 4), podemos concluir que, los usuarios prefieren ver la información gráfica (mapas y gráficas) en pantallas grandes, dejando la representación de indicadores para pantallas más pequeñas como las de los teléfonos móviles.

En relación al tipo de datos a visualizar, podemos determinar que, en líneas generales los usuarios prefieren datos en tiempo real, aunque en el caso del grupo de usuarios denominados “Expertos” en temas relacionados con el medioambiente quieren tener también acceso a los datos históricos para la realización de sus estudios e investigaciones en el ámbito que les atañe.

Como se describió en la sección 6.3.1.1, la evaluación contenía preguntas de control después de que los usuarios hubieran elegido el mapa, gráfica o indicador, pudiendo contrastar si el usuario había comprendido de forma adecuada la representación seleccionada. Después del estudio, podemos considerar los resultados válidos al no detectar problemas de interpretación de las respuestas dadas, obteniendo un 100% de acierto en las valoraciones emitidas al respecto.

Una vez cubiertos todos los objetivos del estudio planteado, y sabiendo representar la información ambiental de forma adecuada en cualquier dispositivo y bajo los tipos de datos requeridos por los ciudadanos, se plantea como trabajo futuro la creación de nuevos servicios y/o aplicaciones que hagan uso de este tipo de representaciones para comunicar, dentro de una red VANET, a los vehículos ofreciendo información en tiempo real del estado de la calidad del aire en ciudad. De esta forma, podemos plantear una red de monitorización ambiental móvil en ciudad (por ejemplo, autobuses) que sean capaces de comunicarse con otros dispositivos de la red completa para determinar las partes contaminadas de la ciudad y, de este modo, poder permitir a los vehículos la elección de rutas alternativas con el objetivo de no emitir más gases nocivos en las partes ya contaminadas.

6.3 Contribuciones del Capítulo

Partiendo de la hipótesis inicial de que las redes vehiculares son apropiadas para la medición de la polución ambiental en ciudad al solucionar el problema detectado que presentan los puntos de medición fijos, este capítulo presenta una contribución principal en la realización de evaluaciones subjetivas que nos permiten conocer de qué manera, sobre qué dispositivos y qué tipo de información son adecuados para la correcta

representación e interpretación de información ambiental recogida por redes de vehículos móviles.

Mediante las evaluaciones realizadas en este capítulo, hemos contribuido a que la comunidad científica tenga una base en la que poder centrar sus esfuerzos en la representación de datos cuando atienden a temas relacionados con el medioambiente. Se propone qué tipo de mapas son apropiados, qué gráficas son las más adecuadas e incluso las mejores representaciones de indicadores, enfocados a su representación en smartphones. Además de esto, también se determina en qué dispositivos es adecuada la presentación de datos ambientales de cada uno de los tipos. En este caso se determina que las representaciones con mayor cantidad de información y con mayor volumen son apropiadas para ordenadores personales, siendo recomendable usar dispositivos con pantallas más pequeñas (como los teléfonos móviles) para presentaciones reducidas de datos. También se determinó qué tipo de dato es más interesante en función de los distintos perfiles de usuarios, concluyendo que a los usuarios que no son expertos en temas relacionados con el medioambiente le interesaban los datos del nivel de la calidad del aire en tiempo real, mientras que, a los expertos en este campo, le interesaban también los datos históricos para la realización de sus análisis y evaluaciones.

Capítulo 7

7 Conclusiones y Trabajos Futuros

El presente capítulo está centrado en exponer las principales conclusiones y líneas de trabajos futuros dentro de la temática de la que versa la presente Tesis Doctoral. Para ello, se proponen, en orden cronológico, las conclusiones generales dentro de las aportaciones efectuadas en el periodo de investigación, que cumplen íntegramente con los objetivos planteados al inicio de la etapa doctoral y que se resumen en el capítulo introductorio (Capítulo 1).

7.1 Conclusiones Generales

Partiendo del objetivo principal de la Tesis Doctoral, basado en la realización de un análisis en profundidad, no solo desde el punto de vista de comunicaciones entre automóviles, sino de flotas de vehículos que atienden a algún servicio proporcionado dentro de los entornos vehiculares, este documento realiza diferentes aportaciones que pretenden dar luz a problemas identificados durante el periodo de investigación.

En primer lugar, mediante la realización de una exhaustiva revisión sobre los estándares dedicados a las comunicaciones vehiculares, entre los que destaca el IEEE 802.11p, y de la simulación de redes VANET, se propone un estudio sobre las herramientas de

simulación encontradas para su despliegue y un caso de estudio aplicado que analiza el intercambio de información de vídeo bajo el estándar H.265/HEVC. Podemos concluir que la simulación es una herramienta fundamental para el planteamiento, diseño, análisis y evaluación de nuevas aplicaciones y servicios dedicados a la implantación de redes VANET dentro de un entorno de Smart City. Este tipo de investigaciones permiten a los vehículos aprovechar las capacidades de comunicación bajo estándares apropiados (como IEEE 802.11p), para proporcionar una mejora en la seguridad vial, gestión del tráfico y ofrecer servicios de información y entretenimiento (*infotainment*) abordo de vehículos. En la actualidad, el despliegue de esta clase de sistemas es inviable desde el punto de vista real debido a la falta de seguridad en carretera que podría ocasionar y al gran gasto que conlleva la implantación de este tipo de tecnología.

A la vista de los resultados obtenidos del caso de estudio propuesto en el Capítulo 3, podemos concluir que la simulación es un pilar fundamental en el análisis y despliegue (simulado) de redes vehiculares. Mediante el estudio mencionado, donde evaluábamos el intercambio de vídeo haciendo uso de herramientas de simulación, podemos ver cómo se comporta una red VANET sencilla consiguiendo una alta tasa de éxito en el intercambio de información entre vehículos. De esta manera, vislumbramos un amplio abanico de soluciones tecnológicas que impliquen la creación y despliegue de servicios y aplicaciones de intercambio de información multimedia.

Continuando con el proceso de investigación, y centrando nuestros esfuerzos en el desarrollo de soluciones que den soporte a la movilidad inteligente dentro de un entorno de Smart City, se decidió diseñar, implementar y desplegar un sistema pionero que permitiera a los vehículos tomar decisiones autónomas sobre la ruta a seguir en ciudad en función del nivel de tráfico que hubiera en ese momento. Mediante el uso de la lógica difusa y comunicaciones vehiculares (entre vehículos y entre vehículos e infraestructuras), se consiguió crear un plan adecuado que permitió reducir hasta en un 12,27% las emisiones que realizaban los vehículos, preservando de esta forma la sostenibilidad ambiental en ciudad.

Mediante las simulaciones realizadas sobre escenarios realistas, localizados en Gijón (Asturias), también podemos concluir que el sistema es eficaz no solo en ubicaciones céntricas de la ciudad, sino también en entornos periféricos de la misma, teniendo en cuenta diferentes densidades de tráfico para simular de la forma más real posible el entorno. Vemos cómo el sistema es capaz de aumentar la velocidad media de los vehículos lo que provoca una disminución en el tiempo de ruta (a pesar de que la distancia media de las rutas sea más larga) al evitar atascos y retenciones en ciudad que conllevaría un mayor nivel de contaminación ambiental y de cierto malestar a los ciudadanos que deberían dedicar más tiempo al proceso de conducción.

A pesar de que las herramientas de simulación forman una parte fundamental en el desarrollo y despliegue de servicios en este tipo de redes, las aplicaciones deben poder ser probadas en entornos reales para verificar que los resultados obtenidos desde el punto de vista simulado, pueden ser obtenidos, de igual forma, en un entorno real. Por ello, la siguiente aportación se centró en el despliegue real de una aplicación, que corría

en teléfonos inteligentes (smartphones) y que era capaz de comunicar dos vehículos de forma real. En este caso, se hacía uso de tecnologías accesibles para los ciudadanos ante el gran coste que supone el despliegue de servicios orientados a estándares dedicados a las redes vehiculares (por ejemplo, IEEE 802.11p). En esta ocasión, la tecnología seleccionada fue *Wi-Fi Direct*, mediante la cual pudimos concluir que, pese a que todavía se necesitan algunas mejoras, por ejemplo, la mejora en el tiempo de conexión entre pares, se puede conseguir una comunicación aceptable en un entorno vehicular. La aportación se basó en el diseño y despliegue de una aplicación que era capaz de detectar cuándo se producía un atasco o una retención (mediante tráfico lento) en tiempo real y que podía transmitir esta información a los vehículos que se encontraban próximos a la ubicación del automóvil que recogía este tipo de información.

La principal conclusión en este sentido, es que el desarrollo y despliegue de nuevas aplicaciones o servicios haciendo uso de tecnologías accesibles (*Wi-Fi Direct* en nuestro caso) pueden actuar como elemento soporte de las redes vehiculares que usan estándares dedicados. De esta forma, estos nuevos sistemas pueden aportar servicios auxiliares dentro de un entorno Smart City que faciliten a los usuarios el acceso de información relativa al estado del tráfico en tiempo real y a su posterior comunicación con otros vehículos con el objetivo de compartir la información recogida. Por otro lado, este tipo de aplicación, proporciona el diseño inicial de un plan de movilidad inteligente en un entorno de ciudad, que puede hacer que los usuarios que la usan sean capaces de determinar la ruta a elegir en función del estado actual de la vía y evitar, de este modo, la pérdida de tiempo en posibles atascos o retenciones de tráfico que perjudican, a su vez, a la calidad ambiental de la urbe.

Llegados a este punto, y teniendo una aplicación desarrollada y testeada, surgió el problema de la usabilidad de dispositivos embarcados en los vehículos, ya que los usuarios, debían tener esta clase de aplicaciones en ejecución en un dispositivo dedicado dentro del vehículo, intentando minimizar los problemas de seguridad que esta metodología de pruebas conllevaba. Por ese motivo, se decidió estudiar la inclusión de dispositivos en este tipo de entorno. Para ello, se llevaron a cabo dos casos de estudio para incorporar dos dispositivos diferentes: dispositivos HDD (Head-Down Display) y dispositivos HUD (Head-Up Display).

En primer lugar, se hacía necesaria la incorporación de una pantalla de tipo HDD (pantalla convencional opaca) en la que se incluyeron dos asistentes de conducción eficiente para valorar el impacto que estos dispositivos causaban en el conductor. En general, los 158 usuarios que participaron en este estudio, desarrollado durante un periodo de entre 3 y 11 meses, adoptaron esta forma de visualización de contenidos de forma positiva, reduciendo el tiempo de aparición de recomendaciones desde el primer hasta el último día de uso. Además, de los análisis llevados a cabo extraemos la conclusión de que influye de forma significativa los grupos de usuarios que intervienen en ellos cuando dividimos la población por edad, género y tipo de ruta que los conductores hacen.

En líneas generales, cuando realizamos la distinción de usuarios dependiendo del género, podemos concluir que el grupo femenino hace peor uso del sistema de recomendación que el masculino y que atendiendo a los datos de población por edad, vemos como el grupo de los usuarios mayores de 41 años siguen de forma más apropiada las recomendaciones que los demás. Además de esto, los resultados cuando analizamos a los conductores en función de las características de las rutas varían en función de la duración de la ruta, teniendo una peor aceptación del sistema cuando las rutas son extremas (rutas muy largas o rutas muy cortas).

Una conclusión notable dentro de este experimento es la cantidad de información que muestra cada uno de los asistentes empleados en pantallas de tipo HDD. Vemos como incrementar la carga mental de los conductores al añadir una mayor cantidad de información, implica un menor seguimiento de las indicaciones del sistema. Esto puede ser debido a que el conductor debe estar pendiente de la pantalla durante más tiempo provocando que, en muchas ocasiones, sea difícil seguir la información mostrada en el asistente.

Debido a los problemas localizados en el primer caso de estudio cuando se realizaban rutas largas y la cantidad de información era elevada, se decidió valorar un tipo de dispositivos de reciente aparición, enfocados a los entornos vehiculares reales; los dispositivos HUD que presentan la información en una pantalla transparente ubicada normalmente en el campo de visión del conductor. En este caso, desde el grupo de investigación en el que se estaba desarrollando la Tesis Doctoral, se adquirió un dispositivo HUD llamado recPOP que sirvió para realizar diversas evaluaciones con el propósito de analizar la incorporación de este tipo de aparatos en un entorno vehicular real haciendo uso de diferentes aplicaciones que atienden a conceptos sobre conducción eficiente (al igual que en el primer caso de estudio propuesto) o aplicaciones de navegación (uno de los elementos más utilizados a día de hoy por los conductores), realizando una evaluación subjetiva a 50 usuarios sobre la inclusión de estos elementos. Por otro lado, también se analizó la interacción mediante reconocimiento de voz con dichos dispositivos haciendo uso de dos modos de interacción por voz: *Google Now Launcher*, que utiliza comandos predeterminados de voz y *Voice Access* que hace uso de un mapa numérico en pantalla para interactuar con el dispositivo.

En líneas generales, los usuarios tenían una mayor sensación de seguridad al volante mediante el uso de este tipo de dispositivos. La comparativa con pantallas convencionales (de tipo HDD - *Head-Down Display*), dejó patente que la preferencia actual tiende a un modo de representación enfocado a los nuevos dispositivos HUD, que están siendo ya incluidos en algunos de los modelos de automóviles de marcas muy conocidas. También, podemos mencionar que para realizar el análisis de resultados hacíamos diferentes grupos de usuarios dependiendo de la experiencia en la conducción, edad, género y uso previo (o no) de dispositivos convencionales en el habitáculo del vehículo (como el GPS), encontrando un mayor interés en la incorporación y uso de estos dispositivos para aquellos usuarios que usan habitualmente pantallas convencionales en el coche.

Atendiendo a la interacción con los dispositivos podemos concluir que los usuarios que participaron en las pruebas preferían, de forma clara, usar la comunicación por voz como método de interacción con este tipo de dispositivos en detrimento de otros medios evaluados tales como, los movimientos gestuales básicos o la interacción directa con el dispositivo mediante la pulsación en una pantalla táctil. En esta ocasión, el método preferido de entre los dos propuestos fue el de *Google Now Launcher*, que hacía uso de un conjunto de comandos de voz predeterminados. Esta elección estaba fundamentada por la dificultad y distracción que provoca mirar el mapa numérico sobre la pantalla que proponía el método alternativo (*Voice Access*).

Una vez abordados los temas sobre movilidad, uso de redes vehiculares y dispositivos embarcados en los vehículos, surgió la idea de aplicar este tipo de soluciones para poder solventar un gran problema en la sociedad actual: la contaminación. De esta forma, se planteó la posibilidad de evaluar cómo se realizan en la actualidad las mediciones de la calidad del aire en entornos urbanos. Desde hace algunos años, los gobiernos hacen esfuerzos por medir la calidad del aire en ciudad, con el objetivo de mitigar o por lo menos reducir los efectos negativos que provoca un nivel elevado de contaminación. Este tipo de medidas, se basan en estaciones de medición fijas, ubicadas a lo largo de la ciudad que ofrecen una representación inexacta de la calidad del aire, pues sólo se pueden medir en puntos concretos. Desde 2012, el grupo de investigación en el que se desarrolla esta Tesis Doctoral en colaboración con algunas empresas del sector, idearon un sistema para la medición de la contaminación ambiental usando redes de vehículos móviles capaces de monitorizar la calidad del aire mediante el uso de flotas de vehículos municipales, como autobuses urbanos o vehículos para la recogida de residuos. Llegados al punto de la obtención de un mapa de contaminación muy preciso de la ciudad y pudiendo evaluar la información recogida casi a tiempo real, el equipo de investigación se dio cuenta de que existía una carencia en el modo de representar los datos. Fue por ese motivo por el que se propuso la siguiente aportación de esta tesis, que nos permitía evaluar cómo representar la información obtenida por la red móvil de vehículos.

Pensando siempre en los ciudadanos, eje vertebrador dentro de un entorno Smart City, estábamos en la necesidad de realizar de nuevo una evaluación subjetiva para saber cómo debían presentarse esos datos a los distintos tipos de usuarios que existen en la ciudad. A parte de esto, también se evaluaron los dispositivos más adecuados para su representación y los tipos de datos que más interesaban a la población que va a hacer uso de ellos.

Para llevar a cabo las evaluaciones, se decidió crear una aplicación que evaluaba las mejores representaciones de datos basadas en mapas de contaminación ambiental, gráficas de niveles de polución en ciudad e incluso indicadores que eran capaces de mostrar un menor nivel de detalle, pero muy útiles para presentar información de forma clara y concisa. Con el objetivo de encontrar la mejor representación y cuáles eran los dispositivos y tipos de datos más apropiados, contábamos con una población de 110 usuarios entre los que hacíamos diferentes grupos para presentar unas líneas de representación en función del perfil de usuario evaluado, especialmente entre usuarios

con distintos niveles de conocimiento en temas ambientales (Expertos, algún conocimiento, ningún conocimiento), aunque también evaluados por el perfil de estudios que poseían (técnicos, humanísticos, científicos, otros).

Los resultados del análisis nos permitieron visualizar cuál era la mejor representación de mapas, gráficas e indicadores, así como el dispositivo más apropiado para la representación de estos y el tipo de dato que más interesaba (datos históricos o en tiempo real) para cada grupo de usuario. De esta manera, se concluye que la gran mayoría de usuarios prefieren representaciones limpias de la información medioambiental con el objetivo de conocer, a simple vista lo que está ocurriendo en la ciudad. Cabe destacar una conclusión que parecía evidente, en la que los usuarios con conocimientos extensos en temas medioambientales, prefieren no solo datos en tiempo real sobre la contaminación de la ciudad, sino también datos históricos que les permitan realizar análisis y evaluaciones sobre la calidad del aire en ciudad para también, poder prever lo que puede ocurrir en el futuro e intentar mitigar los efectos negativos que supondría un nivel alto de contaminación. Por último, merece la pena mencionar que los ciudadanos mostraron un gran interés por esta problemática, siendo una preocupación para muchos de ellos.

Esta sección reúne claramente las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo de la Tesis Doctoral, obteniendo una reflexión principal: A pesar de que esta tesis expone un avance en el desarrollo de sistemas relacionados con la inclusión de redes vehiculares en entornos de Smart City, todavía queda un gran camino por recorrer hacia la implantación real de nuevos retos que permitan instaurar este tipo de sistemas. Por ello, la comunidad científica debe enfocar sus esfuerzos en resolver la problemática actual y futura para poder mejorar la calidad de vida de las personas tanto en las urbes como en los entornos rurales.

7.2 Trabajos Futuros

Pese a que la temática relacionada con las redes vehiculares se lleva estudiando desde hace años, a día de hoy no se han resuelto muchas de las incógnitas planteadas y los problemas inherentes de la aplicación de las nuevas tecnologías en un entorno tan delicado debido al alto coste que conlleva y a los problemas derivados de la seguridad vial. Por ello, aún no se han implantado de forma amplia avances en el parque móvil actual.

Siguiendo el mismo orden que en el apartado anterior, donde se presentaban las conclusiones generales, podemos comenzar hablando sobre los retos y líneas futuras en el campo de la simulación de redes vehiculares. Por un lado, la búsqueda incesante del desarrollo de simuladores que se aproximen lo máximo posible a la realidad, debe ser el eje fundamental dentro de estos entornos al encontrarnos ante una clase de red que tiene unas características y dimensiones muy peculiares. Factores como el uso de una topología altamente dinámica o la definición de patrones de movimiento de los vehículos, ya que estos son conocidos (los vehículos van por las carreteras), son hechos

que deben ser analizados en profundidad para continuar con el avance de la simulación. El objetivo principal de este tipo de desarrollos no es otro que el de aproximar al mínimo el error de los modelos de redes vehiculares que serán implantados en un futuro dentro de un entorno de Smart City.

Mediante la proposición del caso de estudio en el que se transmitían algunas trazas de vídeo, quedó patente la viabilidad de la propuesta atendiendo, bajo ciertas condiciones, a un intercambio de vídeo efectivo y que en un futuro puede ser empleado para el despliegue de servicios que den información multimedia al conductor, bien para fines asociados a la seguridad y eficiencia en la conducción o bien para fines puramente comerciales o de entretenimiento, pudiendo visualizar, por ejemplo, pequeños vídeos con información relativa al contexto en el que nos movemos, tiendas cercanas, anuncios publicitarios, etc.

Centrando la vista en el futuro al hablar de planes de movilidad inteligente, y conociendo los resultados obtenidos mediante el despliegue, en un entorno simulado, de una red VANET realista que hace uso de un enfoque de lógica difusa y comunicaciones vehiculares con el objetivo de detectar y evitar posibles atascos de tráfico en ciudad, podemos pensar en la realización de trabajos futuros enfocados a implantar este planteamiento en un entorno real para comprobar su efectividad. Por otro lado, también se podría evaluar la aceptación de este sistema por parte de los conductores. Parece evidente que el plan de movilidad permite contribuir a la disminución del nivel de contaminación en ciudad, pero no queda claro si esta tecnología podría ser aplicable teniendo en cuenta las opiniones de los ciudadanos. En esta ocasión, la realización de pruebas reales y evaluaciones subjetivas, podrían ser un método de análisis adecuado.

A parte de lo mencionado anteriormente, a la vista del actual crecimiento del número de medios alternativos de transporte en zonas urbanas (como bicicletas), también podría ser interesante enfocar nuestros esfuerzos al diseño de sistemas colaborativos que tengan como objetivo facilitar la integración de vehículos en un entorno urbano, en el que conviven muchos medios de transporte, mejorando aspectos relacionados con la seguridad y la usabilidad de estos servicios en una ciudad.

Otra de las grandes líneas futuras, en la que se ha intentado contribuir a través de esta Tesis Doctoral, es la extrapolación de aplicaciones y servicios desde los entornos simulados hacia los entornos reales. Hoy en día, la mayoría de las grandes investigaciones en el campo que son capaces de implementar una red vehicular completa (incluyendo un gran número de vehículos e infraestructura suficiente en ciudad o entornos interurbanos), han sido desarrolladas dentro del ámbito de la simulación debido a la imposibilidad de trasladar estos experimentos a un ambiente real por el alto coste y problemas de seguridad que conllevaría en la actualidad.

Como ya comentamos anteriormente, nuestra aportación dentro de este ámbito, se centró en la creación de una aplicación que era capaz de detectar cuándo se producía un atasco o una retención (tráfico lento) en ciudad, añadiendo la capacidad de comunicación inter-vehicular mediante el uso de tecnología *Wi-Fi Direct*. En este

sentido, son muchos los hitos que quedan por conseguir y que van desde la creación genérica de nuevos servicios que permitan mejorar la tarea de conducir a la ampliación de los sistemas de comunicaciones haciendo uso de tecnologías alternativas e igualmente accesibles como *Bluetooth LE* o *Wi-Fi Aware*, que podrían ofrecer un rendimiento aceptable para esta clase de servicio. Haciendo referencia a la aplicación desarrollada, podríamos pensar en su optimización para permitir el intercambio de información en modo *multicast o broadcast* (en detrimento del modo P2P actual), que permitiría conseguir comunicaciones globales y eliminación en la repetición de envíos de mensajes. Centrando los trabajos futuros a un ámbito más puntual, quedaría por avanzar en los temas relacionados con la visualización de mapas o información en la aplicación, la incorporación de mecanismos de seguridad avanzados para la protección de las comunicaciones en este tipo de redes e incluso la mejora de la computación interna, capaz de calcular los eventos de tráfico para otorgarle la capacidad de ajustar dinámicamente los parámetros de decisión en función del estado actual de la vía para localizar las incidencias de forma más precisa y efectiva.

Una vez llevado a un entorno real una aplicación capaz de comunicar vehículos, se hacía indispensable el analizar la usabilidad y el impacto que tiene el uso de dispositivos embarcados en el vehículo que debían ser los responsables de presentar la información transmitida por los servicios y aplicaciones. Ante los resultados obtenidos de la gran aceptación que suscita este tipo de dispositivos, nos planteamos una serie de objetivos que deberán ser completados en un futuro. Estas metas, están enfocadas en el análisis de dispositivos adicionales embarcados en los vehículos que enriquezcan la experiencia de los conductores al volante. Principalmente, desde el grupo de investigación se pensó en la posibilidad de trabajar en la línea del aumento de la seguridad en los conductores gracias al uso de Realidad Aumentada en este tipo de entornos. Dentro de estos ambientes, se podría dotar a los dispositivos de tipo HUD con una interfaz de comunicación que permitirá comunicaciones ad-hoc con otros vehículos otorgando información al conductor sobre accidentes o atascos en carretera (atendiendo a aplicaciones como las que se presentan en el Capítulo 4 de este documento) y representando dicha información en interfaces gráficas apropiadas para su correcta visualización. Por último, también se pretenden abordar temas relacionados con el campo de vigilancia de los conductores con el fin de predecir situaciones peligrosas gracias al uso de cámaras y sensores corporales, así como analizar aspectos cognitivos humanos como la fatiga o carga mental que estos dispositivos provocan en los usuarios que los usan.

Por último, dentro del campo de la medición de elementos ambientales que existen actualmente en ciudad, se vislumbran nuevos métodos de representación de información, basándonos en el paradigma de *Business Intelligence* (BI), que nos permitirá representar, casi en tiempo real, los datos recogidos por una red de monitorización ambiental móvil. Llegado a este punto, de poder obtener y representar información de forma adecuada, el trabajo futuro se centra en la explotación de esta información para su correcta visualización usando nuevas tecnologías aplicadas a la movilidad inteligente y a la conducción eficiente. En este campo, aplicaciones o servicios que ofrezcan la selección de rutas apropiadas en función del nivel de

contaminación en ciudad, pueden servir para que el nivel general de la polución detectada disminuya, permitiendo a los ciudadanos y agentes que se encuentran en la ciudad, poder vivir de forma más saludable al tener un entorno menos contaminado.

Como hemos visto, son muchas las líneas de trabajo futuro que ofrece la temática de la que trata la presente Tesis Doctoral, por lo que, cabe pensar que todavía queda mucho trabajo por realizar e investigar en este campo. Las tareas por desarrollar abarcan desde la implantación real de este tipo de redes, al desarrollo de servicios y aplicaciones que hagan uso de ellas. El objetivo claro en ese sentido, es otorgar un beneficio tanto al ciudadano como a la ciudad o provincia en la que se implantan estas tecnologías, contextualizando y fomentando el concepto de Smart City.

Referencias

- [1] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.
- [2] H. Schaffers, N. Komninos, M. Pallot, B. Trousse, M. Nilsson, and A. Oliveira, “Smart cities and the future internet: Towards cooperation frameworks for open innovation,” in *The Future Internet Assembly*, 2011, pp. 431–446.
- [3] Enerlis, Ernest & Young, Ferrovial, Madrid Network, *Libro Blanco Smart Cities*, 1ª Edición. 2012.
- [4] “BOE.es - Documento BOE-A-2004-20410.” [Online]. Available: http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2004-20410. [Accessed: 07-May-2017].
- [5] “BOE.es - Documento BOE-A-2004-19715.” [Online]. Available: http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2004-19715. [Accessed: 07-May-2017].
- [6] “División de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas - Programa 21.” [Online]. Available: <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21sptoc.htm>. [Accessed: 07-May-2017].
- [7] A.-V. Anttiroiko, “Towards citizen-centered local e-government-The case of the city of Tampere,” *Ann. Cases Inf. Technol.*, vol. 6, pp. 370–386, 2004.
- [8] D. Banister, *Sustainable transport and public policy*. EOLSS, 2004.
- [9] L. F. Olivares Villegas, “Implementación de un sistema de control de presencia en el Ayuntamiento de Gijón,” 2013.
- [10] S. González, “Bilbao and Barcelona ‘in motion’. How urban regeneration ‘models’ travel and mutate in the global flows of policy tourism,” *Urban Stud.*, vol. 48, no. 7, pp. 1397–1418, 2011.
- [11] R. Giffinger, C. Fertner, H. Kramar, E. Meijers, and others, “City-ranking of European medium-sized cities,” *Cent Reg Sci Vienna UT*, 2007.
- [12] A. de Valladolid, “‘Valladolid, ríos de luz’: la iluminación sostenible como atractivo turístico y cultural y marca de ciudad,” *HerMus Herit. Museography*, vol. 5, no. 1, pp. 107–115, 2013.
- [13] M. Strohmeier, “Security in Next Generation Air Traffic Communication Networks,” Tesis Doctoral, 2016.
- [14] “eCall: Time saved = lives saved - Digital Single Market - European Commission,” *Digital Single Market*. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/ecall-time-saved-lives-saved>. [Accessed: 29-Apr-2016].
- [15] V. el dictamen del Comité Económico, “DIRECTIVA 2010/40/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 7 de julio de 2010 por la que se establece el marco para la implantación de los sistemas de transporte inteligentes en el sector del transporte por carretera y para las interfaces con otros modos de transporte.”

- [16] “BOE.es - Documento BOE-A-2012-5043.” [Online]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2012-5043. [Accessed: 29-Apr-2016].
- [17] T. A. Dingus, M. C. Hulse, and W. Barfield, *Human factors in intelligent transportation systems*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1998.
- [18] N. W. Prasetya, T. L. Sheu, A. Basuki, and M. A. Muslim, “A pre-emptive traffic model with cluster-based TDMA for vehicular networks,” in *2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2016, pp. 1–5.
- [19] G. F. Marias, P. Georgiadis, D. Flitzanis, and K. Mandalas, “Cooperation enforcement schemes for MANETs: A survey,” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 6, no. 3, pp. 319–332, 2006.
- [20] R. B. Thompson, “Global Positioning System (GPS): The Mathematics of Satellite Navigation,” *MathCAD Libr. Httpwww Mathsoft Comappsindex Html*, 1998.
- [21] Y. Khaleda, M. Tsukadaa, J. Santab, J. Choia, and T. Ernsta, “A usage oriented analysis of vehicular networks: from technologies to applications,” *J. Commun.*, vol. 4, no. 5, pp. 357–368, 2009.
- [22] ETSI TC ITS, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions.” ETSI TR 102 638, Jun-2009.
- [23] “WHO | Global status report on road safety 2015,” *WHO*. [Online]. Available: http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/en/. [Accessed: 29-Apr-2016].
- [24] J. A. Sanchez *et al.*, “Subjective Assessment of Representation Methods for Environmental Mobile Monitoring Networks in Cities,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 12, pp. 3987–3996, 2015.
- [25] L. Pozueco *et al.*, “Impact of on-board tutoring systems to improve driving efficiency of non-professional drivers,” *IET Intell. Transp. Syst.*, 2017.
- [26] J. A. Sánchez, L. Pozueco, X. G. Pañeda, A. G. Tuero, D. Melendi, and R. García, “Incorporation of Head-Up Display Devices in Real-Vehicular Environments to Improve Efficiency in Driving,” in *Proceedings of the XVII International Conference on Human Computer Interaction*, 2016, p. 10.
- [27] L. Delgrossi and T. Zhang, “Dedicated Short-Range Communications,” *Veh. Saf. Commun. Protoc. Secur. Priv.*, pp. 44–51, 2009.
- [28] “IEEE. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.” IEEE Std 802.11p-2010, Jun-2010.
- [29] “IEEE. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.” IEEE Std 802.11-2007, Jul-2007.
- [30] ETSI TC ITS, “European profile standard for the physical and medium access control layer of Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band.” ETSI ES 202 663, Nov-2009.
- [31] IEEE 1609 WG, “IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE).” 2010.
- [32] IEEE 1609 WG, “Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services.” 2010.

- [33] “IEEE. 1609.0-2013 - IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture.” IEEE, 2013.
- [34] “IEEE. 1609.1-2006 - Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Resource Manager.” IEEE, 2006.
- [35] “IEEE. 1609.2-2013 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Security Services for Applications and Management Messages.” IEEE, 2013.
- [36] “IEEE. 1609.3-2016 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services.” IEEE, 2016.
- [37] “IEEE. 1609.4-2016 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-Channel Operation.” IEEE, 2016.
- [38] “IEEE. 1609.6 WG - Remote Management Service Working Group.” IEEE.
- [39] “IEEE. 1609.11-2010 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Over-the-Air Electronic Payment Data Exchange Protocol for Intelligent Transportation Systems (ITS).” IEEE, 2010.
- [40] “IEEE. 1609.12-2012 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Identifier Allocations.” IEEE, 2012.
- [41] SAE, “Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary.” Sep-2015.
- [42] R. Baldessari *et al.*, “Car-2-car communication consortium-manifesto,” 2007.
- [43] M. N. Mariyasagayam, H. Menouar, and M. Len, “GeoNet: A project enabling active safety and IPv6 vehicular applications,” in *Vehicular Electronics and Safety, 2008. ICVES 2008. IEEE international conference on*, 2008, pp. 312–316.
- [44] “COMMunications for eSafety (COMeSafety) project.” .
- [45] T. Halonen, J. Romero, and J. Melero, *GSM, GPRS and EDGE performance: evolution towards 3G/UMTS*. John Wiley & Sons, 2004.
- [46] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, and P. Beming, *3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband*. Academic press, 2010.
- [47] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Academic press, 2013.
- [48] M. N. Tehrani, M. Uysal, and H. Yanikomeroglu, “Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 86–92, 2014.
- [49] X. Ge, Z. Li, and S. Li, “5G Software Defined Vehicular Networks,” *ArXiv Prepr. ArXiv170203675*, 2017.
- [50] A. Rasheed, H. Zia, F. Hashmi, U. Hadi, W. Naim, and S. Ajmal, “Fleet & convoy management using VANET,” *J. Comput. Netw.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2013.
- [51] A. M. Orozco, G. Llano, and R. Michoud, “Redes vehiculares Ad-hoc: aplicaciones basadas en simulación,” *Ingenium*, vol. 6, no. 12, pp. 11–22, 2012.
- [52] “AdaptIVE (Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles) Project.” .
- [53] “DRIVE C2X (Accelerate Cooperative Mobility) Project.” .
- [54] “PRESERVE (Preparing Secure V2X Communication Systems) Project.” .
- [55] “CVIS (Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems) Project.” .
- [56] “iTETRIS (The Open Simulation Platform For Intelligent Transport System (ITS) Services) - Project.” .

- [57] “EVITA (E-safety Vehicle Intrusion Protected Applications) Project.” .
- [58] “OVERSEE (Open Vehicular Secure Platform) Project.” .
- [59] Horizon 2020, “Mobility for Growth - Smart, green and integrated transport challenge.” .
- [60] V. Kumar, S. Mishra, and N. Chand, “Applications of VANETs: present & future,” *Commun. Netw.*, vol. 5, no. 01, p. 12, 2013.
- [61] X. Yang, L. Liu, N. H. Vaidya, and F. Zhao, “A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning,” in *Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2004. MOBIQUITOUS 2004. The First Annual International Conference on*, 2004, pp. 114–123.
- [62] M. Bhatt, S. Sharma, A. Prakash, U. S. Pandey, and K. Jyoti, “Traffic Collision Avoidance in VANET Using Computational Intelligence,” *Int. J. Eng. Technol.*, 2016.
- [63] M. I. Mushtaq and M. Kansal, “A REVIEW ON VEHICLE COLLISION AVOIDANCE SYSTEM IN NETWORKS.”, 2016.
- [64] S. Cherkaoui, O. Chakroun, and M. A. Abid, *Collision avoidance in vehicular networks*. Google Patents, 2016.
- [65] P. Saldaña Alegre and J. M. Vassallo Magro, “Implantación de nuevos sistemas electrónicos de cobro de peaje en España,” *Rev. Obras Públicas*, vol. 159, no. 3528, pp. 7–22, 2012.
- [66] “AERIS (Applications for the Environment: Real-Time Information Synthesis) Program.” .
- [67] P.-Y. Chen, Y.-M. Guo, and W.-T. Chen, “Fuel-saving navigation system in VANETs,” in *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd*, 2010, pp. 1–5.
- [68] J. Santa, P. J. Fernández, and F. Pereñíguez, “Deployment of vehicular networks in highways using 802.11 p and IPv6 technologies,” *Int. J. Ad Hoc Ubiquitous Comput.*, vol. 24, no. 1–2, pp. 33–48, 2017.
- [69] P. J. Fernández, J. Santa, F. Pereñíguez, and A. F. Skarmeta, “Towards Seamless Inter-Technology Handovers in Vehicular IPv6 Communications,” *Comput. Stand. Interfaces*, 2017.
- [70] J. Gabarron, E. Lopez, and J. Haro, “Evaluacion de mecanismos de priorizacion en 802.11 p con VHDL,” *VII Jornadas Ing. Telemat.*, pp. 190–196.
- [71] J. Santa, M. Tsukada, T. Ernst, O. Mehani, and A. F. Gómez-Skarmeta, “Assessment of VANET multi-hop routing over an experimental platform,” *Int. J. Internet Protoc. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 158–172, 2009.
- [72] H. Hasrouny, A. E. Samhat, C. Bassil, and A. Laouiti, “VANet security challenges and solutions: A survey,” *Veh. Commun.*, 2017.
- [73] N. R. Siddiqui, K. A. Khaliq, and J. Pannek, “VANET Security Analysis on the Basis of Attacks in Authentication,” in *Dynamics in Logistics*, Springer, 2017, pp. 491–502.
- [74] D. B. Rawat and C. Bajracharya, “Securing VANETs for Vehicular CPS,” in *Vehicular Cyber Physical Systems*, Springer, 2017, pp. 41–60.
- [75] J. Harri, F. Filali, and C. Bonnet, “Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 11, no. 4, pp. 19–41, Fourth 2009.

- [76] M. Fiore and others, “Mobility models in inter-vehicle communications literature,” *Politec. Torino*, p. 147, 2006.
- [77] R. M. Hernández, J. G. Haro, and E. E. López, “Evaluación de herramientas de simulación de redes vehiculares,” *Jorn. Introd. Investig. UPCT*, no. 4, pp. 109–111, 2011.
- [78] W. Vandenberghe, I. Moerman, and P. Demeester, “Approximation of the IEEE 802.11 p standard using commercial off-the-shelf IEEE 802.11 a hardware,” in *ITS Telecommunications (ITST), 2011 11th International Conference on*, 2011, pp. 21–26.
- [79] D. Krajzewicz, G. Hertkorn, C. Rössel, and P. Wagner, “SUMO (Simulation of Urban MObility)-an open-source traffic simulation,” in *Proceedings of the 4th middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM20002)*, 2002, pp. 183–187.
- [80] J. Härrri, F. Filali, C. Bonnet, and M. Fiore, “VanetMobiSim: generating realistic mobility patterns for VANETs,” in *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks*, 2006, pp. 96–97.
- [81] I. Stepanov, J. HAEHNER, C. BECKER, J. TIAN, and K. ROTHERMEL, *Canu mobility simulation environment (canumobisim)*. Online, 2005.
- [82] D. R. Choffnes and F. E. Bustamante, “An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks,” in *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, 2005, pp. 69–78.
- [83] N. Aschenbruck, R. Ernst, E. Gerhards-Padilla, and M. Schwamborn, “BonnMotion: a mobility scenario generation and analysis tool,” in *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, 2010, p. 51.
- [84] András Varga, “OMNeT++ Discrete Event Simulator.” [Online]. Available: <https://omnetpp.org/>. [Accessed: 28-Apr-2016].
- [85] S. McCanne, S. Floyd, K. Fall, K. Varadhan, and others, *Network simulator ns-2*. 1997.
- [86] G. F. Riley and T. R. Henderson, “The ns-3 network simulator,” in *Modeling and Tools for Network Simulation*, Springer, 2010, pp. 15–34.
- [87] T. R. Henderson, S. Roy, S. Floyd, and G. F. Riley, “ns-3 project goals,” in *Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network simulator*, 2006, p. 13.
- [88] R. Barr, Z. J. Haas, and R. van Renesse, “Jist/swans,” *Wirel. Netw. Lab. Cornell Univ. Httpjst Ece Cornell Edu*, 2005.
- [89] C. Sommer, *Veins: Vehicles in network simulation*. 2014.
- [90] G. D. Cameron and G. I. Duncan, “PARAMICS—Parallel microscopic simulation of road traffic,” *J. Supercomput.*, vol. 10, no. 1, pp. 25–53, 1996.
- [91] M. Piorkowski, M. Raya, A. L. Lugo, P. Papadimitratos, M. Grossglauser, and J.-P. Hubaux, “TraNS: realistic joint traffic and network simulator for VANETs,” *ACM SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 31–33, 2008.
- [92] A. Wegener, M. Piórkowski, M. Raya, H. Hellbrück, S. Fischer, and J.-P. Hubaux, “TraCI: an interface for coupling road traffic and network simulators,” in *Proceedings of the 11th communications and networking simulation symposium*, 2008, pp. 155–163.

- [93] S. Y. Wang and C. L. Chou, “NCTUns tool for wireless vehicular communication network researches,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 17, no. 7, pp. 1211–1226, 2009.
- [94] C. Cicconetti, F. Galeassi, and R. Mambrini, “IEEE 802.11 p: laboratory measurements and analysis,” in *FITCE Congress (FITCE), 2011 50th*, 2011, pp. 1–5.
- [95] G. Jiménez Pinto, D. López, and L. F. Pedraza, “Simulation and Performance Analysis of Protocols for Unicast Vanet,” *Tecnura*, vol. 16, no. 31, pp. 66–75, 2012.
- [96] A. Sotos, J. L. Martínez, and J. M. Villalón, “Estudio y evaluación de prestaciones del estándar 802.11p para redes vehiculares.” Trabajo Fin de Grado. Universidad de Castilla-La Mancha, 2013.
- [97] A. G. Caicedo Bastidas, J. M. Martínez Ojeda, and G. A. Méndez, “Evaluación del Desempeño de Redes 802.11 p/WAVE en la Transmisión de Datos, Voz y Video IP,” *Rev. Univ. RUTIC*, vol. 1, no. 1, 2012.
- [98] I. Rozas-Ramallal, T. M. Fernández-Caramés, A. Dapena, and J. A. García-Naya, “Evaluation of H. 264/AVC over IEEE 802.11 p vehicular networks,” *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2013, no. 1, pp. 1–13, 2013.
- [99] I. Rozas-Ramallal, T. M. Fernández-Caramés, A. Dapena, P. Cuenca-Castillo, and others, “Improving performance of h. 264/avc transmissions over vehicular networks,” in *Integrated Network Management (IM 2013), 2013 IFIP/IEEE International Symposium on*, 2013, pp. 1324–1327.
- [100] A. Vinel, E. Belyaev, O. Lamotte, M. Gabbouj, Y. Koucheryavy, and K. Egiazarian, “Video transmission over IEEE 802.11p: Real-world measurements,” in *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 2013, pp. 505–509.
- [101] M. De Felice, E. Cerqueira, A. Melo, M. Gerla, F. Cuomo, and A. Baiocchi, “A distributed beaconless routing protocol for real-time video dissemination in multimedia VANETs,” *Comput. Commun.*, vol. 58, pp. 40–52, 2015.
- [102] E. Belyaev, A. Vinel, A. Surak, M. Gabbouj, M. Jonsson, and K. Egiazarian, “Robust vehicle-to-infrastructure video transmission for road surveillance applications,” 2014.
- [103] F. K. Karnadi, Z. H. Mo, and K. Lan, “Rapid generation of realistic mobility models for VANET,” in *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE*, 2007, pp. 2506–2511.
- [104] “Video Trace Library.” [Online]. Available: <http://trace.eas.asu.edu/>. [Accessed: 28-Apr-2016].
- [105] J. Jiao, J. Wang, F. Jin, and M. Dunford, “Impacts on accessibility of China’s present and future HSR network,” *J. Transp. Geogr.*, vol. 40, pp. 123–132, 2014.
- [106] D. H. Stolfi and E. Alba, “Red Swarm: smart mobility in cities with EAS,” in *Proceedings of the 15th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, 2013, pp. 1373–1380.
- [107] A. Kauerhof, “Strategies for Autonomous, Connected and Smart Mobility in the Automotive Industry. A Comparative Analysis of BMW Group and Tesla Motors Inc.,” 2017.

- [108] H. Youn, M. T. Gastner, and H. Jeong, "Price of anarchy in transportation networks: efficiency and optimality control," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, no. 12, p. 128701, 2008.
- [109] P. Tientrakool, Y.-C. Ho, and N. F. Maxemchuk, "Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle communication and sensors for collision avoidance," in *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE*, 2011, pp. 1–5.
- [110] S. Hallé, J. Laumonier, and B. Chaib-Draa, "A decentralized approach to collaborative driving coordination," in *Intelligent Transportation Systems, 2004. Proceedings. The 7th International IEEE Conference on*, 2004, pp. 453–458.
- [111] N. Kitwiroon, Y. Yu, H. Mao, and R. S. Sokhi, "Traffic Management impact in London, using OSCAR," *Air Qual. Assess. Eur. Local Cont. Scale Air4EU Deliv. D*, vol. 7, 2007.
- [112] L. I. Panis *et al.*, "PM, NO_x and CO₂ emission reductions from speed management policies in Europe," *Transp. Policy*, vol. 18, no. 1, pp. 32–37, 2011.
- [113] M. Mahmood, B. Van Arem, R. Pueboobpaphan, and R. De Lange, "Reducing local traffic emissions at urban intersection using ITS countermeasures," *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 78–86, 2013.
- [114] Y. Gu, S. Lin, and N. F. Maxemchuk, "A fail safe broadcast protocol for collaborative intelligent vehicles," in *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2015 IEEE 16th International Symposium on a*, 2015, pp. 1–6.
- [115] L. A. Zadeh, "The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 11, no. 1–3, pp. 199–227, 1983.
- [116] L. Dimitriou, T. Tsekeris, and A. Stathopoulos, "Adaptive hybrid fuzzy rule-based system approach for modeling and predicting urban traffic flow," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 16, no. 5, pp. 554–573, 2008.
- [117] K. Zrar Ghafoor, K. Abu Bakar, M. van Eenennaam, R. H. Khokhar, and A. J. Gonzalez, "A fuzzy logic approach to beaconing for vehicular ad hoc networks," *Telecommun. Syst.*, pp. 1–11, 2013.
- [118] E. H. Mamdani, "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis," in *Proceedings of the sixth international symposium on Multiple-valued logic*, 1976, pp. 196–202.
- [119] A. Cappiello, I. Chabini, E. K. Nam, A. Lue, and M. A. Zeid, "A statistical model of vehicle emissions and fuel consumption," in *Intelligent Transportation Systems, 2002. Proceedings. The IEEE 5th International Conference on*, 2002, pp. 801–809.
- [120] S. J. Elias, M. N. B. M. Warip, R. B. Ahmad, and A. H. A. Halim, "A Comparative Study of IEEE 802.11 Standards for Non-Safety Applications on Vehicular Ad Hoc Networks: A Congestion Control Perspective," in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2014, vol. 2.
- [121] M. S. Akbar, M. S. Khan, K. A. Khaliq, A. Qayyum, and M. Yousaf, "Evaluation of IEEE 802.11 n for Multimedia Application in VANET," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 32, pp. 953–958, 2014.
- [122] D. Camps-Mur, A. Garcia-Saavedra, and P. Serrano, "Device-to-device communications with Wi-Fi Direct: overview and experimentation," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 96–104, 2013.

- [123] O. M. Abu-Sharkh, E. AlQaralleh, and O. M. Hasan, “Adaptive device-to-device communication using Wi-Fi Direct in smart cities,” *Wirel. Netw.*, pp. 1–17, 2016.
- [124] W.-F. Alliance, “Wi-fi certified wi-fi direct,” *White Pap.*, 2010.
- [125] Y.-C. Tseng, S.-Y. Ni, Y.-S. Chen, and J.-P. Sheu, “The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network,” *Wirel. Netw.*, vol. 8, no. 2/3, pp. 153–167, 2002.
- [126] B. C. McDonald, D. R. Gentner, A. H. Goldstein, and R. A. Harley, “Long-term trends in motor vehicle emissions in US urban areas,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 17, pp. 10022–10031, 2013.
- [127] J. Nzouonta, N. Rajgure, G. Wang, and C. Borcea, “VANET routing on city roads using real-time vehicular traffic information,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 7, pp. 3609–3626, 2009.
- [128] M. R. Hafner, D. Cunningham, L. Caminiti, and D. Del Vecchio, “Cooperative collision avoidance at intersections: Algorithms and experiments,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 1162–1175, 2013.
- [129] G. Weinberg, B. Harsham, and Z. Medenica, “Evaluating the usability of a head-up display for selection from choice lists in cars,” in *Proceedings of the 3rd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 2011, pp. 39–46.
- [130] G. S. Larue, H. Malik, A. Rakotonirainy, and S. Demmel, “Fuel consumption and gas emissions of an automatic transmission vehicle following simple eco-driving instructions on urban roads,” *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 8, no. 7, pp. 590–597, 2014.
- [131] L. Kang, B. Qi, D. Janecek, and S. Banerjee, “EcoDrive: A Mobile Sensing and Control System for Fuel Efficient Driving,” in *Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, New York, NY, USA, 2015, pp. 358–371.
- [132] E. Adell, A. Várhelyi, and M. Hjälm Dahl, “Auditory and haptic systems for in-car speed management – A comparative real life study,” *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 11, no. 6, pp. 445–458, Nov. 2008.
- [133] A. D. Horowitz and T. A. Dingus, “Warning Signal Design: A Key Human Factors Issue in an In-Vehicle Front-To-Rear-End Collision Warning System,” *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.*, vol. 36, no. 13, pp. 1011–1013, Oct. 1992.
- [134] E. Adell, A. Varhelyi, M. Alonso, and J. Plaza, “Developing human-machine interaction components for a driver assistance system for safe speed and safe distance,” *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–14, Mar. 2008.
- [135] J. B. F. Van Erp and H. A. H. C. Van Veen, “Vibrotactile in-vehicle navigation system,” *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 7, no. 4–5, pp. 247–256, Jul. 2004.
- [136] A. Rionad, D. Martínez, X. Pañeda, D. Arbesú, E. Jimenez, and F. Linera, “Cated Box, una tecnología para hacer estudios de movilidad 2.0,” *Iber. J. Inf. Syst. Technol.*, no. 10, pp. 97–110, 2012.
- [137] A. Rionda Rodríguez, D. Martínez Álvarez, X. G. Paneda, D. Arbesu Carbajal, J. E. Jimenez, and F. Fernandez Linera, “Tutoring System for the Efficient Driving

- of Combustion Vehicles,” *Tecnol. Aprendiz. IEEE Rev. Iberoam. De*, vol. 8, no. 2, pp. 82–89, May 2013.
- [138] A. Rionda *et al.*, “Blended learning system for efficient professional driving,” *Comput. Educ.*, vol. 78, pp. 124–139, Sep. 2014.
- [139] D. D. Waard and K. A. Brookhuis, “Behavioural adaptation of drivers to warning and tutoring messages: results from an on-the-road and simulator test,” *Int. J. Heavy Veh. Syst.*, vol. 4, no. 2–4, pp. 222–234, Enero 1997.
- [140] D. Schrank, B. Eisele, T. Lomax, and J. Bak, “2015 urban mobility scorecard,” 2015.
- [141] V. Charissis and M. Naef, “Evaluation of Prototype Automotive Head-Up Display Interface: Testing Driver’s Focusing Ability through a VR Simulation,” in *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2007, pp. 560–565.
- [142] H. Park and K. Kim, “Efficient Information Representation Method for Driver-Centered AR-HUD System,” in *Design, User Experience, and Usability. User Experience in Novel Technological Environments*, A. Marcus, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 393–400.
- [143] M. Tonnis, C. Lange, and G. Klinker, “Visual Longitudinal and Lateral Driving Assistance in the Head-Up Display of Cars,” in *6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2007. ISMAR 2007*, 2007, pp. 91–94.
- [144] S. Y. Cheng, A. Doshi, and M. M. Trivedi, “Active Heads-up Display based Speed Compliance Aid for Driver Assistance: A Novel Interface and Comparative Experimental Studies,” in *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2007, pp. 594–599.
- [145] C. Yoon, K. Kim, H. S. Park, M. W. Park, and S. K. Jung, “Development of augmented forward collision warning system for Head-Up Display,” in *2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2014, pp. 2277–2279.
- [146] A. Rionda *et al.*, “UrVAMM—A full service for environmental-urban and driving monitoring of professional fleets,” in *New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE), 2013 International Conference on*, 2013, pp. 1–6.
- [147] ITU-R Report, “BT. 1210-4. Test materials to be used in assessment of picture quality,” International Telecommunication Union, 2012.
- [148] ITU-R Report, “BT. 1082-1. Studies toward the unification of picture assessment methodology,” International Telecommunication Union, Jan. 1990.
- [149] ITU-R Report, “BT. 500-12. Metodology for the subjective assessment of the quality of television pictures,” International Telecommunication Union, 2009.
- [150] D. Hasenfratz, O. Saukh, S. Sturzenegger, and L. Thiele, “Participatory air pollution monitoring using smartphones,” *Mob. Sens.*, 2012.
- [151] B. Elen *et al.*, “The Aeroflex: A Bicycle for Mobile Air Quality Measurements,” *Sensors*, vol. 13, pp. 221–240, 2013.
- [152] A. Rionda *et al.*, “UrVAMM #x2014; A full service for environmental-urban and driving monitoring of professional fleets,” in *2013 International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE)*, 2013, pp. 1–6.

- [153] L. M. ZWACK, S. R. HANNA, J. D. SPENGLER, and J. I. LEVYA, “Using advanced dispersion models and mobile monitoring to characterize spatial patterns of ultrafine particles in an urban area,” *Atmos. Environ.*, vol. 45, no. 28, pp. 4822–4829, 2011.
- [154] “CartoDB.” [Online]. Available: www.cartodb.com. [Accessed: 24-Mar-2015].
- [155] M. MEAD *et al.*, “The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks,” *Atmos. Environ.*, vol. 70, pp. 186–203, 2013.
- [156] O. US EPA, “AirData website AQI Plot page.” [Online]. Available: http://www.epa.gov/airdata/ad_viz_plotaqi.html. [Accessed: 24-Mar-2015].
- [157] M. Van Poppel, J. Peters, and N. Bleux, “Methodology for setup and data processing of mobile air quality measurements to assess the spatial variability of concentrations in urban environments,” *Environ. Pollut.*, vol. 183, pp. 224–233, 2013.
- [158] S. N. Behera, M. Sharma, P. K. Mishra, P. Nayak, B. Damez-Fontaine, and R. Tahon, “Passive measurement of NO₂ and application of GIS to generate spatially-distributed air monitoring network in urban environment,” *Urban Clim.*, 2015.
- [159] E. Bales, N. Nikzad, C. Ziftci, N. Quick, W. Griswold, and K. Patrick, *Personal Pollution Monitoring: Mobile Real-Time Air-Quality in Daily Life*. 2014.
- [160] M. Stevens and E. D’Hondt, “Crowdsourcing of pollution data using smartphones,” in *Workshop on Ubiquitous Crowdsourcing*, 2010.
- [161] W. Willett, P. Aoki, N. Kumar, S. Subramanian, and A. Woodruff, “Common Sense Community: Scaffolding Mobile Sensing and Analysis for Novice Users,” 2010.
- [162] M. Vaahteranoksa and T. Vuori, “Threshold value for acceptable video quality using signal-to-noise ratio,” in *Electronic Imaging 2007*, 2007, pp. 649405–649405.

Apéndice A: Glosario de Acrónimos

3G: 3rd Generation (Redes Móviles)

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

4G: 4^a Generation (Redes Móviles)

ABR: Adaptative Beaconing Rate

AQI: Air Quality Index

BER: Bit Error Rate

C2C: Car to Car

CALM: Communications Access for Land Mobiles

CanuMobiSim: CANU Mobility Simulation Environment

CCH: Control CHanel

C-ITS: Cooperative Intelligent Transport Systems

CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance

DHCP: Dynamic Host Configuration Protocol

DLNA: Digital Living Network Alliance

EDCA: Enhanced Distributed Channel Access

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

GPS: Global Positioning System

GUI: Graphical User Interface

HCI: Human-Computer Interaction

HDD: Head-Down Display

HDV: Heavy-Duty Vehicle

HUD: Head-Up Display

I2V: Infrastructure to Vehicle

IBSS: Independent Basic Service Set

IDE: Integrated Development Environment

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IP: Internet Protocol

IPv6: Internet Protocol version 6

ITS: Intelligent Transportation Systems

ITU-T: ITU Telecommunication Standardization Sector

JiST: Java in Simulation Time

JOSM: Java OpenStreetMap

JRE: Java Runtime Environment

JVM: Java Virtual Machine

MAC: Media Access Control

MIB: Management Information Base

NCTUns: National Chiao Tung University network simulator

NED: NEtwork Description

NSF: U.S. National Science Foundation

OBU: On-Board Unit

OSI: Open Systems Interconnection

P2P: Peer to Peer

PER: Packet Error Rate

PMUS: Planes de Movilidad Urbana Sostenible

RSU: Road-Side Unit

SCH: Service Chanel

SDK: Software Development Kit

SME: System Management Entity

STRAW: STreet RAndom Waypoint

SUMO: Simulation of Urban MOvility

TCP: Transmission Control Protocol

TIC: Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

TIGER: Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing

TraCI: Traffic Control Interface

TraNS: Traffic and Network Simulation Environment

UDP: User Datagram Protocol

URL: Universal Resource Locator

USB: Universal Serial Bus

V2I: Vehicle to Infrastructure

V2V: Vehicle to Vehicle

WAVE: Wireless Access in Vehicular Environments

WBSS: WAVE Basic Service Set

WEP: Wired Equivalent Privacy

WLAN: Wireless Local Area Network

WPS: Wi-Fi Protected Setup

