UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

POLITÉCNICA

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES
TERRITORIALES Y SOCIOECONÓMICOS, LA MOVILIDAD Y
LA INFRAESTRUCTURA EN LA SINIESTRALIDAD
DE LAS TRAVESÍAS ESPAÑOLAS**

TESIS DOCTORAL

NATALIA CASADO SANZ

Grado en Ingeniería Civil

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Madrid, 2020

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DEL TRANSPORTE,
TERRITORIO Y URBANISMO**
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES
TERRITORIALES Y SOCIOECONÓMICOS, LA MOVILIDAD Y
LA INFRAESTRUCTURA EN LA SINIESTRALIDAD
DE LAS TRAVESÍAS ESPAÑOLAS**

NATALIA CASADO SANZ

Grado en Ingeniería Civil

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Director:

Begoña Guirao Abad

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Madrid, 2020

POLITÉCNICA

Tribunal nombrado por el Excelentísimo y Magnífico Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ____ de _____ de 2020.

Presidente: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día ____ de _____ de 2020 en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Acuerda otorgarle la calificación de: _____

Madrid, ____ de _____ de 2020

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

*Te la dedico a ti, mamá.
Tu luz brillará por siempre
en nuestros corazones.*

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que de alguna manera han contribuido a la realización de esta tesis doctoral. Son muchas las personas a las que tengo que agradecer el apoyo y el estímulo que me han brindado en esta etapa, pues sin ellas no hubiese sido posible la culminación de este largo periodo de trabajo, estudio y esfuerzo.

En primer lugar, quiero agradecer a mi Directora de tesis, Begoña Guirao, por haber confiado en mí para la realización de este trabajo. Su ánimo, apoyo, dedicación y sus consejos han hecho posible el desarrollo de esta investigación. Gracias por tu paciencia, por todos los conocimientos que me has transmitido y por guiarme en esta experiencia, gracias por ser y por estar, tanto en el ámbito estrictamente académico como en el de carácter personal y humano. Sin duda he aprendido mucho en este transcurso de tiempo que hemos dedicado a la tesis.

Quiero darle las gracias también a los profesores Miguel Marchamalo y Luis Ramos, por ofrecerme su dedicación, ayuda y disponibilidad en todo momento. Sus siempre oportunas y sabias aportaciones han contribuido de forma significativa a mejorar esta tesis doctoral. También me gustaría dirigir mis agradecimientos a la Dirección General de Tráfico del Ministerio del Interior, por facilitarme los datos sin los que la investigación no hubiera sido posible, y especialmente a Pedro Tomás Martínez y Beatriz Zúñiga, quienes desinteresadamente estuvieron siempre ahí atendiendo mis dudas. Sus respuestas fueron siempre positivas y muy útiles.

De la misma forma, tengo que darles las gracias a todos mis compañeros de laboratorio, que me acompañaron al embarcarme en el doctorado y con quienes he compartido muy buenos momentos, tanto dentro como fuera de la escuela, y en los que siempre encontré el apoyo y la ayuda necesaria.

También, y para mí fundamental, dar las gracias a toda mi familia, por ayudarme a seguir adelante y luchar por cumplir todas mis metas. A mis padres y a mis hermanos que han sufrido y se han alegrado conmigo a lo largo de esta etapa. A mi pareja Sergio, por su cariño, paciencia e incesante motivación. Y en especial a mi madre, que aunque no puedo compartir con ella la culminación de este trabajo, siento que me sigue acompañando en todo lo que hago. Ella es y será siempre mi ejemplo de dedicación y fortaleza. Y por último, a mi sobrina, por llegar dando luz a mi vida y darme las fuerzas necesarias para finalizar esta etapa. Gracias infinitas.

Índice

ABSTRACT	13
RESUMEN	15
BLOQUE I: INTRODUCCIÓN	17
I.1. Contexto	17
I.2. Planteamiento y objetivos.....	19
I.3. Fases de la investigación	20
I.4. Estructura de la tesis	22
I.5. Listado de publicaciones originales.....	23
BLOQUE II: ANTECEDENTES	23
CAPÍTULO II.1 LA SEGURIDAD VIAL Y SU EVOLUCIÓN EN EL MUNDO	23
1. Generalidades de la accidentalidad vial	24
1.1. Los accidentes de tráfico	24
1.2. Factores causantes de los accidentes	24
1.2.1. Factor humano	24
1.2.2. Factor vehículo	29
1.2.3. Factor vial-ambiental	29
1.3. Clases de accidentes de tráfico	29
1.4. Fases del accidente.....	30
1.5. Sistema de indicadores para la seguridad vial	31
2. La seguridad vial en el contexto internacional	31
2.1. Las principales cifras de la siniestralidad vial en el mundo	31
2.2. Las políticas de seguridad vial en el contexto internacional	34
3. La seguridad vial en la Unión Europea	35
3.1. Las principales cifras de la siniestralidad vial en Europa	35
3.2. Evolución de las políticas de seguridad vial en Europa	40
4. La seguridad vial en España	43
4.1. Las principales cifras de la siniestralidad vial en España	43
4.2. Evolución de las políticas de seguridad vial en España.....	48
CAPÍTULO II.2 ENVEJECIMIENTO DE LA POBLACIÓN Y SEGURIDAD VIAL	49
1. Las principales cifras del envejecimiento poblacional	49
2. El envejecimiento poblacional y la seguridad vial	52
3. Efectos funcionales de la edad en la conducción	53
4. El envejecimiento poblacional, la concentración urbana y la siniestralidad vial	54
CAPÍTULO II.3 LAS TRAVESÍAS ESPAÑOLAS	55
1. El concepto de travesía	55
2. La problemática de las travesías	57
3. Caracterización de la accidentalidad en travesías	58
CAPÍTULO II.4 FUENTES DE INFORMACIÓN DISPONIBLES	63
1. Base de datos empleada: Registro Nacional de Accidentes de Tráfico	63
2. Limitaciones de la base de datos	67
3. Comparación entre bases de datos internacionales	68
4. Clasificación de posibles factores determinantes	70
CAPÍTULO II.5 MODELOS ESTADÍSTICOS EN EL ANÁLISIS DE ACCIDENTES	71
1. Modelos estadísticos empleados en el análisis de accidentes	71
1.1. Generalidades	71
1.2. Modelos lineales ordinarios	72

1.3. Modelos lineales generales	72
1.3.1. Modelo de Poisson	73
1.3.2. Modelo de binomial negativa	74
1.4. Modelos de variables cualitativas	75
BLOQUE III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	75
CAPÍTULO III.1 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE LA BASE DE DATOS	75
1. Introducción	75
2. Metodología de obtención de factores de infraestructura	76
2.1. Trazado en planta	76
2.1.1. Longitud de la travesía	76
2.1.2. Radio mínimo de la travesía y secuencia de radios	77
2.1.3. Radio promedio en el tramo	80
2.1.4. Indicador de relación entre radio máximo y mínimo	80
2.1.5. Indicador de relación entre radio mínimo y promedio	80
2.1.6. Indicador de relación entre radio mínimo y promedio por longitud	81
2.2. Trazado en alzado	81
2.2.1. Indicador de cambio de curvatura vertical	81
2.2.2. Tasa promedio de curvatura vertical	83
2.2.3. Indicador promedio de la diferencia de alturas	83
3. Metodología de obtención de indicadores de exposición al riesgo	84
4. Metodología de obtención de variables socioeconómicas	85
5. Metodología de obtención de factores territoriales	85
5.1. Indicador de separación física o efecto barrera	85
5.2. Indicador de separación de actividad	87
5.3. Indicador mixto	88
CAPÍTULO III.2 METODOLOGÍA PARA LA SEGMENTACIÓN DE ACCIDENTES	89
1. Introducción	89
2. Clúster k-medias	93
2.1. Fundamento teórico	93
2.2. Ventajas y desventajas del análisis clúster k-medias	94
3. Análisis de clases latentes	94
3.1. Fundamento teórico	94
3.2. Ventajas y desventajas del análisis de clases latentes	95
3.3. Estimación de parámetros	96
3.4. Selección del número de clústeres óptimo	96
CAPÍTULO III.3 METODOLOGÍA PARA LA MODELIZACIÓN DE LA SEVERIDAD	97
1. Introducción	97
2. Modelos de regresión logística multinomial y binaria	99
2.1. Formulación e interpretación de los modelos	99
2.2. Interpretación de los modelos	101
2.3. Métodos de estimación	102
2.4. Bondad del ajuste del modelo	103
2.5. Contrastes sobre los parámetros del modelo	104
2.6. Métodos de selección de los modelos	105
2.7. Validación de los modelos	106
BLOQUE IV: PUBLICACIONES	107

IV.1. Paper A: Investigating the risk factors associated with the severity of the pedestrians injured on Spanish crosstown roads	107
IV.2. Paper B: Population ageing and rural road accidents: Analysis of accident severity in traffic crashes with older pedestrians on Spanish crosstown roads	126
IV.3. Paper C: Analysis of the risk factors affecting the severity of traffic accidents on Spanish crosstown roads: The driver's perspective	138
BLOQUE V: RESULTADOS	165
V.1. Análisis de la gravedad del accidente desde la perspectiva de los peatones	165
V.1.1. Resultados del análisis clúster	165
V.1.2. Resultados del modelo de regresión logística multinomial	166
V.2. Análisis de la gravedad del accidente desde la perspectiva de los peatones ancianos	169
V.2.1. Resultados del modelo de regresión logística binaria	169
V.3. Análisis de la gravedad del accidente desde la perspectiva del conductor	171
V.3.1. Resultados del análisis clúster	172
V.3.2. Resultados del modelo de regresión logística multinomial	174
V.4. Análisis de la seguridad vial desde diferentes perspectivas: conductores vs peatones	176
BLOQUE VI: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	177
VI.1. Conclusiones	177
VI.2. Futuras líneas de investigación	179
REFERENCIAS	180

Listado de figuras

Figura 1. Esquema de las fases de la investigación llevadas a cabo	21
Figura 2. Gráfica de Blumenthal.....	24
Figura 3. Actitudes de seguridad declaradas por los usuarios de la carretera	25
Figura 4. Riesgo de fallecimiento de un peatón en función de la velocidad	26
Figura 5. Probabilidad ser responsable de un accidente mortal en función tasa alcoholemia	27
Figura 6. Relación de eventos elementales para la ilustración de la interacción entre usuarios	31
Figura 7. Tasas de fallecidos en accidentes de tráfico por cada 100.000 habitantes por regiones. Comparación entre los años 2013 y 2016.....	32
Figura 8. Distribución de víctimas mortales en las regiones del mundo en función del tipo de usuario.....	33
Figura 9. Proporción de población, fallecidos por accidentes de tráfico y vehículos por categorías de ingresos de los países, 2016.....	33
Figura 10. Pilares proyecto impulsado por el Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020.....	34
Figura 11. Evolución del número de víctimas mortales de accidentes de tráfico de la Unión Europea en relación al objetivo establecido en el periodo 2001-2020	35
Figura 12. Número anual de fallecidos, heridos graves y leves en la Unión Europea en 2007-2016	36
Figura 13. Distribución de víctimas mortales por modo de transporte en la UE, año 2016.....	36
Figura 14. Distribución de fallecidos en función del tipo de usuario y del sexo, año 2016.....	37
Figura 15. Fallecidos por millón de habitantes en los países de la UE, 2016 vs 2007.....	38
Figura 16. Cambio porcentual en el número de fallecidos y heridos en accidentes de tráfico en la Unión Europea entre 2007 y 2016, por país	39
Figura 17. Imagen del Libro Blanco de 2001 (izquierda) y 2011 (derecha)	41
Figura 18. Objetivos estratégicos de la Unión Europea	42
Figura 19. Evolución de los fallecidos en accidentes de tráfico en España entre 1998-2018.....	43
Figura 20. Evolución de las víctimas de accidentes de tráfico en España entre 1998-2018.....	44
Figura 21. Evolución de la distribución porcentual del número de víctimas mortales en accidentes de tráfico según modo de transporte, 2010-2018	44
Figura 22. Distribución del número de accidentes con víctimas, fallecidos y heridos hospitalizados según el tipo de vía. España, 2018.....	45
Figura 23. Evolución del parque de vehículos, movimientos de largo recorrido, censo de conductores y fallecidos en vías interurbanas de España (2008-2018).....	46
Figura 24. Tasa de fallecidos por millón de habitantes desagregada por provincias. España, 2018.....	47
Figura 25. Prioridades de la Estrategia de Seguridad Vial 2011-2020, España.....	48
Figura 26. Pirámide de la población mundial en 1990 en función del sexo	50
Figura 27. Pirámide de la población mundial en 2020 en función del sexo	50
Figura 28. Proyección del tamaño de población en la Unión Europea en función de los diferentes grupos de edad. Valores expresados en millones de habitantes. Europa, 2001-2050.....	51
Figura 29. Comparación del censo de conductores por cada 1.000 habitantes entre los años 2009 y 2019 en España, en función de los grupos de edad	52
Figura 30. Convergencia de vías de distinta titularidad en el núcleo urbano de El Ejido (Almería)	56
Figura 31. Efecto barrera que produce la travesía a su paso por una población. Interferencia de la travesía con los itinerarios peatones de los residentes	57
Figura 32. Travesía de Cangas, en Pontevedra, Galicia	58
Figura 33. Mapa de accidentalidad de las travesías con heridos graves y fallecidos 2006-2015.....	59

Figura 34. Tamaño de las poblaciones españolas donde han tenido lugar accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido, 2006-2015	60
Figura 35. Porcentaje de población mayor de 65 años del conjunto de poblaciones con accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido, 2006-2015	60
Figura 36. Tasa de desempleo de las poblaciones donde han tenido lugar accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido, 2006-2015	60
Figura 37. Renta per cápita de las poblaciones donde han tenido lugar accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido, 2006-2015	61
Figura 38. Porcentajes de los tipos de víctimas implicadas en accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido. Periodo 2006-2015.....	61
Figura 39. Edad de los conductores implicados en accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido. Periodo 2006-2015.....	61
Figura 40. Edad de los peatones implicados en accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido. Periodo 2006-2015.....	62
Figura 41. Sexo de las víctimas implicadas en accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido. Periodo 2006-2015.....	62
Figura 42. Esquema de funcionamiento de la aplicación ARENA2	66
Figura 43. Fuentes de información en el Registro Estatal de Víctimas de Accidentes de Tráfico	66
Figura 44. Datos de la planta y el perfil del vehículo tipo seleccionado.....	78
Figura 45. Ejemplo de medición de radios de una travesía	78
Figura 46. Ejemplo de informe de giros generado por el software AutoTURN (izquierda) e interfaz del programa de selección del radio mínimo de la travesía (derecha)	79
Figura 47. Información altimétrica de la travesía de la población Sotillo de la Adrada.....	82
Figura 48. Ejemplo del mapa de tráfico nacional	84
Figura 49. Procedimiento de medición del área edificada a ambos márgenes de la vía, empleado en la elaboración de un índice para valorar el efecto barrera generado	85
Figura 50. Ejemplo de travesía donde se aprecia la ubicación de los POIs a cada lado de la vía	87
Figura 51. Ejemplos de aplicación del indicador mixto	89
Figura 52. Ranking de variables significativas obtenidas en los diversos análisis realizados para explorar los principales factores que contribuyen a la gravedad del accidente	176

Listado de tablas

Tabla 1. Evolución número de fallecidos en accidente de tráfico en la UE 2007-2016, por país	38
Tabla 2. Evolución de los fallecidos por grupos de edad. España, 2012-2018	45
Tabla 3. Evolución de víctimas mortales en accidentes de tráfico por CC.AA. España, 2009-2018.....	46
Tabla 4. Comparación entre las variables recogidas en los distintos registros oficiales de accidentes de tráfico (EEUU, Unión Europea, Australia, Nueva Zelanda y España).....	69
Tabla 5. Características del vehículo empleado para la simulación realizada con el software AutoTURN para la recopilación de los radios de las travesías.....	78
Tabla 6. Información altimétrica de los pks de la travesía de la población Sotillo de la Adrada	83
Tabla 7. Diferencia de alturas promedio de la travesía de la población Sotillo de la Adrada	84
Tabla 8. Tipo de travesía en función de los valores que pueden tomar el índice de separación poblacional y porcentaje de edificación en ambos márgenes de la vía	86
Tabla 9. Porcentaje de servicios de interés a cada lado de la travesía en función de los valores que puede tomar el índice de permeabilidad peatonal	88

ABSTRACT

Since the origin of the motor car in the 19th century and its intensive universalisation in recent decades, a whole host of social and personal transformations has occasioned, which have caused great changes in people's life and in different societies throughout the world. The progress of motorization in industrialized countries has developed a physical, psychological, and economic revolution, serving as an encouragement for the creation of numerous infrastructures and making self-propelled vehicles as indispensable instrument in today's way of life. Today, more than a billion cars are in circulation around the world. These figures clearly indicate that motor vehicles have become indisputable protagonists in today's society. However, even though this fact has greatly favoured the development of the economy and transport, at the same time there have been numerous undesirable effects, such as environmental pollution, increased energy consumption and most importantly, the increase in traffic accidents and their consequences in terms of human losses and economic costs.

Globally, road traffic accidents are an important public health concern which needs to be tackled. Although progress has been made in recent years in reducing traffic accidents and, above all, in the number of serious and fatal crashes, the truth is that today they continue to be the eighth cause of mortality in the world. A multidisciplinary approach is required to understand what causes them and to provide the evidence for policy support. In addition, to this problem is added the generalized process of population aging that the developed countries are undergoing. The increase in life expectancy has led to an increase in the age group of over 65 years and forecasts indicate this segment of the population will continue to grow in the next 50 years. In terms of road safety, this fact translates into an increase in the number of elderly users (drivers, pedestrians, and cyclists) in relation to the total population. The fragility and comorbidity of this vulnerable group highlights the need for research and investment in infrastructure to improve road safety and adapt roads to an aging population.

In Spain, one of the routes that has presented a greater rise in accidents, after years of decline, has been crosstown roads, a particular type of urban road. Continuous conflicts and negative effects occur in the, affecting both road users and the resident population. The inhabitants of these population centres have seen how the arterial streets have been absorbed by an inter-urban route, giving rise to conflicts between the needs of urban mobility and the greater demands for speed demanded by inter-urban traffic. This road has registered very high accident rates in recent years, reaching 2% of all fatalities and serious traffic injuries in the country. The causes of the high accident rate in this type of road are not yet clarified and knowing them constitutes a fundamental step to reduce accidents. Until now, the road safety research and specifically the studies in charge of analysing the casuistry of traffic accidents have focused solely on analysing variables related to victims, infrastructure, and vehicle. However, there are many other factors not included in the accident records that aim to be decisive in the accident rate of these routes.

The objective of this doctoral thesis has been to analyse the accidents that occurred on Spanish crosstown roads in the period 2006-2016 in order to know what factors are determining in the severity of the accident and how they affect different road users, taking into account the perspectives of both the driver and the pedestrian. A methodology was developed that allowed the design of an own database through ad-hoc procedures, complementing the official accident registry with layout variables, territorial factors, and exposure indicators. Cluster analysis techniques in combination with logistic regression models were applied to analyse three different scenarios: first, all accidents involving a single vehicle and one involved pedestrian were examined, taking into account all age groups; Subsequently, a second analysis analysed

accidents involving vulnerable users, elderly pedestrians; finally, accidents were studied from the driver's perspective.

Regarding territorial factors, the main results revealed the importance of considering them when analysing accident injury severity, turning out to be very significant in all the scenarios analysed. Furthermore, it was shown that the probability of a fatal outcome is greater in peri-urban crosstown roads than in central ones. In relation to the activity centres, it was concluded that the accident severity is reduced when the population where the accident occurs has the services distributed throughout the whole territory, compared to those crosstown roads where the services are located on only one side of the road. On the other hand, regarding exposure factors, it has been concluded that crosstown roads with a low traffic volume lead to a greater severity of pedestrian accidents, as do those crosstown roads with a high percentage of heavy vehicles. Regarding infrastructure, the results suggest that the greater the lane width, the greater the severity of the injuries. Also, crosstown roads without road markings are more likely to cause fatal injuries.

Likewise, comparing the results obtained under the different perspectives of the users, it can be concluded that the most determining variables in the case of drivers were the infractions committed and the type of accident, while in the case of pedestrians of all groups of age, were the infractions and the age of the pedestrian. However, if we consider only elderly pedestrians, the variables that most influenced accident injury severity were visibility restrictions and physical and activity indexes.

Finally, it is important to highlight that the absence of studies of crosstown roads in Spain makes the results of this research a useful tool for the assessment of road accidents on this type of road and that they can serve for the competent authorities to make decisions in their eagerness to reduce the number of victims through the formulation of road safety policies. However, the results obtained in this doctoral thesis should be considered as the conclusion of a preliminary study, given that there are many other factors, both of the geometry of the road and of the circulation, related to the environment, the human factor or the vehicle that could have an influence on the problem that is analysed, and that have not been considered due to lack of information. Following this same line, the analysis of all those factors related to the trip made by the user, its type and the reasons for it, are data that we do not know and for which we do not have information and that would allow us to improve the analysis of road accidents in general, and more specifically that of this investigation. Similarly, there are other limitations in the development of this analysis, in which it would be convenient to delve into future new lines of research.

RESUMEN

Desde el origen del automóvil en el siglo XIX y su intensiva universalización en las últimas décadas, se ha originado todo un cúmulo de transformaciones sociales y personales, que han causado grandes cambios en la vida de las personas y en las diferentes sociedades en todo el mundo. El progreso de la motorización en los países industrializados ha desarrollado una revolución física, psíquica y económica, sirviendo de estímulo para la creación de numerosas infraestructuras y convirtiendo los vehículos autopropulsados en un instrumento indispensable en la forma de vida actual. A día de hoy, en todo el mundo circulan más de mil millones de automóviles. Estas cifras indican que los vehículos a motor se han convertido en indiscutibles protagonistas de la sociedad actual. Sin embargo, a pesar de que este hecho ha favorecido notablemente el desarrollo de la economía y el transporte, a la misma vez se han producido numerosos efectos no deseables, como pueden ser la contaminación ambiental, el aumento del consumo energético y lo más importante, el incremento de los accidentes de tráfico y sus consecuencias en términos de pérdidas humanas y costes económicos.

A nivel mundial, los accidentes de tráfico suponen un importante problema de salud pública que debe abordarse. Si bien en los últimos años se ha avanzado progresivamente en la reducción de los accidentes de tráfico y, sobre todo, en el número de accidentes graves y mortales, lo cierto es que a día de hoy siguen siendo la octava causa de mortalidad del mundo. Se requiere un enfoque multidisciplinario para comprender qué los causa y proporcionar la evidencia para el apoyo de políticas. Además, a este problema se le suma el proceso generalizado de envejecimiento poblacional que están sufriendo los países desarrollados. El incremento de la esperanza de vida ha dado lugar a un aumento del grupo de edad de mayores de 65 años y las previsiones indican que este segmento de población seguirá creciendo en los próximos 50 años. En términos de seguridad vial, este hecho se traduce en un aumento en el número de usuarios de edad avanzada (conductores, peatones y ciclistas) en relación al total poblacional. La fragilidad y comorbilidad de este grupo vulnerable pone de manifiesto la necesidad de investigación e inversión en infraestructura para mejorar la seguridad vial y adaptar las carreteras a una población envejecida.

En España, una de las vías que ha presentado un mayor repunte de la siniestralidad, tras años de decrecimiento, han sido las travesías, un tipo particular de carretera urbana. En ellas se producen conflictos y efectos negativos que afectan tanto a los usuarios de la carretera como a la población residente. Los habitantes de estos núcleos poblacionales han visto cómo las calles arteriales han quedado absorbidas por una ruta interurbana, dando lugar a conflictos entre las necesidades de la movilidad urbana y las mayores demandas de velocidad que exigen los tráficos interurbanos. En los últimos años las travesías han registrado tasas de accidentes muy altas, alcanzando el 2% de todas las muertes y lesiones graves de tráfico del país. Las causas de la elevada siniestralidad en este tipo de vías no están todavía clarificadas y conocerlas constituye un paso fundamental para reducir los accidentes. Hasta ahora, la investigación en seguridad vial y concretamente los estudios encargados de analizar la casuística de los accidentes de tráfico se han centrado únicamente en analizar variables relacionadas con las víctimas, la infraestructura y el vehículo. Sin embargo, existen muchos otros factores no recogidos en los registros de accidentes que apuntan a ser determinantes en la siniestralidad de estas vías.

El objetivo de esta tesis ha sido analizar los accidentes ocurridos en las travesías españolas en el periodo 2006-2016 con el fin de conocer qué factores son determinantes en la gravedad del accidente y cómo afectan los mismos a los diferentes usuarios de la vía, teniendo en cuenta la perspectiva tanto del conductor como del peatón. Se ha desarrollado una metodología que ha permitido diseñar una base de datos propia mediante procedimientos *ad-*

hoc, complementando el registro de accidentes oficial con variables de trazado, factores territoriales e indicadores de exposición. Adicionalmente, se han utilizado técnicas de análisis clúster en combinación con modelos de regresión logística para analizar tres escenarios distintos. En primer lugar, se analizaron todos los accidentes con un solo vehículo y un peatón implicado, teniendo en cuenta todos los grupos de edad. En un segundo lugar, en un segundo análisis se examinaron los accidentes que involucraban a usuarios vulnerables, los peatones de edad avanzada; finalmente, se analizaron los accidentes desde la perspectiva del conductor.

Con respecto a los factores territoriales, los principales resultados revelaron la importancia de considerar este tipo de variables cuando analizamos la gravedad de los accidentes, resultando ser muy significativos en todos los escenarios analizados. Además, se demostró que la probabilidad de un desenlace mortal es mayor en las travesías periurbanas que en las centrales. En relación a los centros de actividad, se llegó a la conclusión de que la gravedad del accidente se reduce cuando la población donde se produce el accidente tiene los servicios distribuidos a lo largo de todo el territorio, en comparación con aquellas travesías donde los servicios están localizados en un único lado de la vía. Por otro lado, en lo que respecta a los factores de exposición, se ha concluido que las travesías con un volumen de tráfico bajo conducen a una mayor gravedad de los accidentes de peatones, al igual que aquellas travesías con un porcentaje alto de vehículos pesados. Con respecto a la infraestructura, los resultados sugieren que cuanto mayor es el ancho del carril, mayor es la gravedad de las lesiones. Además, las travesías sin marcas viales tienen más probabilidades de causar lesiones mortales.

Asimismo, comparando los resultados obtenidos bajo las diferentes perspectivas de los usuarios, se pueden concluir que las variables más determinantes en el caso de los conductores fueron las infracciones cometidas y el tipo de accidente, mientras que en el caso de los peatones de todos los grupos de edad, fueron las infracciones y la edad del peatón. Sin embargo, si tenemos en cuenta únicamente los peatones de edad avanzada, las variables que más influyen en la gravedad de las lesiones fueron las restricciones de visibilidad y los índices de separación física y de actividad.

Finalmente, es importante destacar que la ausencia de estudios de travesías en España hace que los resultados de esta investigación sean una herramienta útil para la valoración de la siniestralidad vial en este tipo de vías y que pueden servir para que las autoridades competentes tomen decisiones en su afán por reducir el número de las víctimas mediante la formulación de políticas de seguridad vial. No obstante, los resultados obtenidos en la presente tesis doctoral deben considerarse como la conclusión de una investigación que debe mantenerse “viva”, incorporando en el futuro variables que, a día de hoy, son complejas por su dificultad en los métodos de obtención. Siguiendo esta misma línea, el análisis de todos aquellos factores relacionados con el viaje que realiza el usuario, su tipología y los motivos del mismo, son datos que desconocemos y de los que no tenemos información y que permitiría mejorar el análisis de la siniestralidad vial en general, y más concretamente el de esta investigación. De igual modo, existen otras limitaciones en el desarrollo de este análisis, en el que sería conveniente profundizar en futuras nuevas líneas de investigación.

BLOQUE I: INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

Los accidentes de tráfico suponen a nivel mundial un importante problema de salud pública, ya que tienen asociados no sólo pérdidas humanas, sino también elevados costes económicos. Si bien en los últimos años se ha avanzado progresivamente en la reducción de los accidentes de tráfico y, sobre todo, en el número de accidentes graves, lo cierto es que a día de hoy aún queda mucho por hacer para alcanzar los objetivos propuestos. Actualmente, los accidentes de tráfico siguen siendo la octava causa de mortalidad en el mundo. Según la Organización Mundial de la Salud, en el año 2018 fallecieron 1.35 millones de personas como consecuencia de un accidente de tráfico (OMS, 2018). Gracias a la mejora de las infraestructuras y los vehículos, a los cambios legislativos y a la concienciación ciudadana, se está logrando reducir la siniestralidad en las carreteras. Sin embargo, a pesar de que los accidentes con fallecidos han disminuido, los accidentes leves siguen aumentando, constituyendo un problema de primera magnitud al que los países tendrán que hacer frente en los próximos años.

En comparación con la situación mundial, el continente europeo está viendo reflejado los grandes esfuerzos que se están realizando a nivel nacional, regional y local, presentando una perspectiva futura mucho más favorable que el resto de continentes. En el año 2018 se registraron 25.100 fallecidos en carreteras en la Unión Europea y aproximadamente 135.000 personas resultaron heridos graves (Comisión Europea, 2018). Entre los años 2001 y 2010, el número de fallecidos en accidentes de tráfico en la Unión Europea disminuyó un 43% y entre los años 2010 y 2018 se redujo otro 21%. Sin embargo, las cifras aún siguen siendo alarmantes y este es un precio humano y social inaceptable e innecesario a pagar por la actividad de la movilidad. Tan sólo en términos económicos, el coste anual de accidentes de tráfico en la Unión Europea se ha estimado en 280 billones de euros, equivalente al 2% del PIB (Comisión Europea, 2018).

En España, la situación es similar a la de la Unión Europea. A lo largo del año 2018, los diferentes cuerpos policiales encargados de la vigilancia de tráfico registraron 102.299 accidentes de tráfico con víctimas. Estos accidentes dieron lugar a 1.806 fallecidos y un total de 8.935 heridos graves (DGT, 2018). Además, 129.674 personas resultaron heridas leves. La Dirección General de Tráfico (DGT) considera fallecido a aquella persona que fallece en el acto o dentro de los siguientes treinta días como consecuencia de un accidente de tráfico. El herido grave es aquella víctima que requiere una hospitalización superior a 24h, mientras que un herido leve hace referencia a una víctima con asistencia sanitaria igual o inferior a 2h (DGT, 2018). Con respecto al año anterior, el número de accidentes de tráfico con víctimas se ha visto incrementado ligeramente, con 66 accidentes más. En relación al número de fallecidos, éstos han disminuido en un 1%, resultando 24 fallecidos menos que en 2017. Además, también se logró reducir el número de heridos graves en un 6%, a pesar de que el número de heridos leves se incrementó en 58 personas. Sin embargo, a pesar de que se ha logrado reducir ligeramente el número de fallecidos y heridos graves, el número de accidentes sigue creciendo y las cifras están aún lejos de los valores alcanzados en 2011 y 2012 (DGT, 2018). Una de las vías que ha presentado un mayor repunte de la siniestralidad, tras años de decrecimiento, han sido las travesías, un tipo particular de carretera urbana. Esta vía ha registrado en los últimos años tasas de accidentes muy altas, alcanzando el 2% de todas las muertes y lesiones graves de tráfico del país. En las travesías urbanas los conflictos de tráfico se proyectan en su máxima expresión. El paso de una carretera por un núcleo urbano produce tensiones tanto en la población, que soporta impactos ambientales y elevados índices de peligrosidad, como en el tráfico de paso, que se ve obligado a disminuir la velocidad y a recorrer itinerarios asiduamente congestionados. Los habitantes de estos núcleos poblacionales han visto cómo las calles arteriales han quedado absorbidas por una ruta interurbana, dando lugar a conflictos entre las necesidades de la movilidad urbana y las

mayores demandas de velocidad que exigen los tráficos interurbanos. Además, toda infraestructura de transporte lineal de tráfico elevado y altas velocidades implica una barrera física para peatones y ciclistas, que separa la población en dos áreas urbanizadas cada vez más diferenciadas y menos conectadas.

En 2013, las travesías españolas registraron un 47% más de accidentes con víctimas que en 2012; en 2014, un 88% más que en 2013 y aunque en el año 2015 se reflejó un leve descenso (-3%) respecto a 2014, estas cifras se volvieron a incrementar en 2016 y 2017, siendo los años con mayor número de accidentes de la última década (1.465 y 1.655 accidentes con víctimas respectivamente). Además, estas vías presentan una mayor gravedad que el resto. Su índice de letalidad (definido como el número de muertes por cada 100 víctimas) para el año 2017 fue de 2.1, mientras que en el resto de vías urbanas fue 0.6. En el año 2018, ocurrieron 1.597 accidentes, donde fallecieron 43 personas, 169 resultaron heridas hospitalizadas y 1.883 heridas no hospitalizadas (DGT, 2018). Estas cifras están lejos de las cifras alcanzadas en 2011 y 2012 (523 accidentes; 37 muertos; 113 heridos graves). Consecuentemente, la DGT en su Plan Estratégico (2011) ya subrayó como objetivo revisar las travesías y elaborar recomendaciones técnicas específicas en ellas para mejorar la seguridad vial de los usuarios vulnerables (DGT, 2011). Además, en 2019 la DGT publicó un documento en referencia a un nuevo marco para abordar la gestión, la ordenación y el tratamiento de las travesías, poniendo de manifiesto las diversas necesidades que se conjugan en estos tramos de la red de carreteras y con el objetivo de avanzar en la mejora de sus funciones y perspectivas que las engloban, desde la seguridad vial hasta la habitabilidad, pasando por la movilidad (DGT, 2019).

Por otro lado, otro de los aspectos fundamentales a tener en cuenta es que las travesías se concentran mayoritariamente en ciudades pequeñas y medianas (Abellán, Alaya y Pujol, 2018), de menos de 50.000 habitantes, en las que existe una mayor dependencia de la conducción debido a la ausencia y a las limitaciones del transporte público (Yuan y Lin, 2013; Litman, 2015). La mayoría de los residentes de las áreas rurales sufren mayores tasas de mortalidad en carretera que aquellos que viven en áreas urbanas (Marshall y Ferencak, 2017). De hecho, en España, las áreas rurales constituyen sólo el 20% de la población, pero sorprendentemente, representan alrededor del 71% de las muertes en accidentes de tráfico (DGT, 2018). Además, en estas poblaciones donde tienen lugar los accidentes en travesías, el porcentaje de algunos usuarios vulnerables, como la población anciana, tiende a ser alto. En España, en pueblos con menos de 2.000 habitantes, el 28,2% de la población es anciana (Abellán et al., 2018). Esto es muy importante y debe tenerse en cuenta al analizar la siniestralidad de las travesías porque el envejecimiento poblacional es un proceso generalizado y preocupante en los países desarrollados. El incremento de la esperanza de vida ha provocado que el grupo de edad de mayores de 65 años esté aumentando más rápido que cualquier otro y se espera que continúe siendo el segmento de población con mayor tasa de crecimiento durante al menos los próximos 50 años. En términos de seguridad vial, este grupo vulnerable está ganando también una especial relevancia, ya que el porcentaje de usuarios de carretera mayores (conductores, peatones y ciclistas) en relación con el total poblacional está aumentando. Esta tendencia es motivo de gran preocupación, ya que, por ejemplo, está demostrado que los conductores mayores de 65 años de edad experimentan más muertes anuales relacionadas con la conducción por kilómetro que cualquier otro grupo de edad (Polders et al., 2015). Estos hallazgos plantean el problema de la equidad social de los impactos de los accidentes sobre la población y destacan la necesidad de investigación e inversión en infraestructura en las zonas rurales para mejorar la seguridad vial y adaptar las carreteras a una población envejecida.

Las causas de la elevada siniestralidad en este tipo de vías no están todavía clarificadas y conocerlas constituye un paso fundamental para reducir los accidentes. El estudio de la

seguridad vial en las travesías resulta complejo tanto por la heterogeneidad de los atributos que las caracterizan como por la dispersión y dificultad en la interpretación de los datos existentes. Los factores socioeconómicos, poblacionales y territoriales, junto con la infraestructura y los niveles de movilidad, resultan, a priori, los más determinantes en la siniestralidad de estas vías, pero la falta de estudios y literatura publicados al respecto, ponen de manifiesto la necesidad de buscar una metodología de análisis contrastada. A estos problemas hay que añadir que las bases oficiales de accidentalidad (registro de accidentes) no suelen incorporar todas las variables que serían necesarias para realizar un análisis global que permitiese tener en cuenta todos los factores influyentes, como pueden ser indicadores territoriales (efecto barrera, localización de puntos de interés), factores de exposición (IMD) o variables de trazado de la infraestructura (radios mínimos, consistencia del trazado, inclinación de la rasante, etc.). Todo esto obliga a los investigadores a diseñar sus propias bases de datos mediante costosos procedimientos *ad-hoc* y este es uno de los principales motivos por los que existen muy pocas investigaciones que relacionen la influencia de estos factores con la siniestralidad vial.

Por tanto, el objetivo de la presente investigación es encontrar respuestas que cubran las lagunas existentes en el conocimiento de la casuística de los accidentes de tráfico en las travesías españolas. Para ello, se recopilará el mayor número de variables posibles que permitan realizar un análisis holístico del problema y determinar cuáles son los factores clave que intervienen en la gravedad de los accidentes. Este análisis se realizará teniendo en cuenta las diferentes perspectivas de dos de los usuarios principales en este tipo concreto de vías: los conductores y los peatones. Se prestará especial atención a los usuarios vulnerables: los peatones y los usuarios de edad avanzada. Finalmente, se demostrará la importancia de incorporar a los modelos otro tipo de variables en el estudio de siniestralidad vial, además de las variables de infraestructura, del vehículo y de la víctima como se ha venido realizando hasta ahora.

1.2. Planteamiento y objetivos

En la revisión bibliográfica efectuada durante el desarrollo de la presente tesis, se han destacado numerosos estudios que analizan las causas, los factores de riesgo y los niveles de gravedad de los accidentes de tráfico, principalmente en Europa y Norteamérica. También se revisaron los estudios previos existentes que relacionaban la siniestralidad vial y el envejecimiento poblacional, especialmente en áreas rurales. Sin embargo, en relación con las travesías españolas, no se conoce en la literatura ninguna investigación en la que se hayan empleado técnicas estadísticas para evaluar los factores determinantes en este tipo de accidentes en España. Además, tal y como se puede observar en la literatura previa analizada, la mayoría de los estudios que analizan la severidad de los accidentes de tráfico tienen en cuenta únicamente variables relacionadas con la infraestructura, la víctima y el vehículo, ignorando por completo los factores territoriales, socioeconómicos y de exposición al tráfico.

En este contexto, el **objetivo general** de esta tesis doctoral se centra en el desarrollo de metodología que permita analizar todos aquellos factores relacionados con la siniestralidad vial en travesías y conocer las causas que dan lugar a accidentes graves en las mismas. Para lograr la meta planteada, este objetivo general se articula en los siguientes **objetivos específicos**:

- Identificar las variables que se deben examinar para llevar a cabo un análisis completo y global de la siniestralidad de las travesías españolas, incluyendo indicadores descriptivos de la población afectada, la movilidad, la infraestructura y los factores territoriales, con el fin de obtener una base de datos consistente de las travesías.
- Desarrollar una metodología que permita recopilar las variables que no están presentes en las bases de datos de accidentes disponibles y que deben ser medidas *ad-hoc* (variables de trazado, variables territoriales y de exposición al tráfico).

Crear unos índices que permitan cuantificar la influencia del efecto barrera y de la actividad de la población sobre la gravedad de los accidentes en travesías.

- Agrupar los accidentes en categorías homogéneas para reducir la heterogeneidad de los mismos mediante el empleo de métodos estadísticos multivariantes de clasificación automática de datos.
- Desarrollar un modelo estadístico para determinar la influencia del conjunto de variables analizadas en la gravedad de las lesiones producidas como consecuencia de los accidentes, bajo el punto de vista de los diferentes usuarios de la vía.
- Analizar los accidentes en travesías desde el punto de vista del peatón, identificando los factores de riesgo y prestando especial atención al factor de envejecimiento.
- Analizar los accidentes en travesías desde el punto de vista del conductor, identificando los factores de riesgo que incrementan la probabilidad de fallecer.

I.3. Fases de la investigación

La presente tesis doctoral ha sido estructurada en las siguientes fases que a continuación se describen. En la Figura 1 se puede observar un esquema gráfico que recoge todas las fases por las que ha pasado la presente investigación.

- 1) Revisión de los antecedentes y de la disponibilidad de la información. Análisis del estado del arte en cuanto a la evolución de la accidentalidad, las políticas de mejora de la seguridad vial a nivel global y a las experiencias existentes en el mundo con relación al análisis de travesías, prestando especial atención a las publicaciones que abordan la agrupación de tramos viarios y su relación con la siniestralidad.
- 2) Tratamiento de las bases de datos de accidentalidad e inventarios de carreteras. Primera toma de contacto con el registro de accidentes de la Dirección General de Tráfico. Extracción de los datos referentes a travesías del registro de accidentes.
- 3) Recopilación de información de travesías. Con el fin de elaborar una base de datos más completa, una buena parte del proceso de investigación se dedicó a la obtención de indicadores no recogidos sistemáticamente en el registro nacional de accidentes y que fueron medidos ad-hoc. Para ello se elaboró una metodología que permitió recopilar variables de trazado e indicadores territoriales que posteriormente permitieron crear unos índices para analizar la consistencia de la vía, la influencia del efecto barrera y las actividades de interés de la población.
- 4) Análisis exploratorio de los datos para conocer la muestra disponible. Localización geográfica de accidentes y creación de mapas de accidentalidad.
- 5) Identificación del modelo estadístico más apropiado para la investigación de esta tesis y definición de las variables que se van a considerar.
- 6) Agrupación de accidentes en categorías homogéneas para reducir la heterogeneidad de los mismos mediante el empleo de técnicas de análisis clúster.
- 7) Definición de un modelo estadístico para identificar las variables de infraestructura, de movilidad, territoriales y relacionadas con las víctimas, que incrementan la gravedad.
- 8) Conclusiones, recomendaciones y difusión de resultados. La última fase de la investigación ha consistido en la síntesis de los resultados más importantes y en la propuesta de recomendaciones técnicas para la toma de decisiones de mejora de travesías. Asimismo, ha concluido con la difusión de resultados a través de tres publicaciones en revistas de alto impacto, así como varias ponencias en congresos.
- 9) Identificación de nuevas líneas de investigación.

Figura 1. Esquema de las fases de la investigación llevadas a cabo. Fuente: elaboración propia

I.4. Estructura de la tesis

El contenido de la presente tesis doctoral ha sido estructurado en los siguientes bloques que a continuación se describen:

- **Bloque I Introducción**, en el cual se realiza una breve introducción al tema de investigación. En este bloque se aborda la situación actual a nivel mundial, europeo y nacional de la problemática de los accidentes de tráfico, así como el planteamiento y los objetivos de la tesis. Además, en este bloque se describen las diferentes fases de la investigación y la estructura del presente documento. Finalmente, se incluye un listado de las publicaciones originales derivadas de esta tesis doctoral.
- **Bloque II Antecedentes**, centrado en los aspectos generales que soportan el desarrollo de la tesis doctoral. Se inicia en el capítulo II.1 con el análisis del marco teórico de los accidentes de tráfico y su evolución en el mundo, su ocurrencia y factores que los provocan, haciendo especial énfasis en los estudios e investigaciones desarrolladas en el ámbito de la accidentalidad vial basadas en el registro de accidentes y los problemas que se pueden encontrar con las bases de datos de accidentes de tráfico. A continuación, en el capítulo II.2 se establece un marco teórico que aborda el envejecimiento de la población y su relación con la seguridad vial, poniendo de manifiesto los futuros retos a los que se enfrentan los diferentes países. El capítulo II.3 se centra fundamentalmente en las travesías españolas, abordando aspectos como sus funciones, el contexto normativo o el panorama actual de este tipo concreto de vía en España. Finalmente, los capítulos II.4 y II.5 hacen referencia a las fuentes de información disponibles y a las técnicas de análisis estadístico que se utilizarán en el análisis de datos de esta tesis doctoral.
- **Bloque III Metodología**, en el que se realiza una descripción de la metodología de la investigación y de las fases que se han desarrollado, así como de la justificación de la elección del modelo. Este capítulo engloba la descripción de la metodología empleada para la recopilación de las variables y el diseño de la base de datos, la metodología aplicada para la segmentación de los accidentes y finalmente para la modelación de la severidad.
- **Bloque IV Publicaciones**, en el cual se refleja la difusión de resultados a través de tres publicaciones en revistas de alto impacto.
- **Bloque V Resultados**, en el cual se exponen, analizan y discuten todos los resultados obtenidos al aplicar la metodología desarrollada a la base de datos. Los resultados obtenidos en este capítulo hacen referencia a los tres análisis llevados a cabo: análisis de la gravedad del accidentes desde la perspectiva de los peatones en general, análisis de la gravedad del accidente desde la perspectiva de los peatones ancianos en particular y el análisis de la gravedad del accidente desde la perspectiva del conductor.
- **Bloque VI Conclusiones**, en el que se incluyen las conclusiones y principales aportaciones de la tesis, así como las limitaciones existentes y las nuevas líneas de investigación que se pueden abrir a partir de estos resultados. A final de este documento se incluye un capítulo de referencias y bibliografía consultada.

1.5. Listado de publicaciones originales

La producción científica de la presente tesis doctoral se ha materializado en tres artículos publicados en revistas indexadas en el Science Citation Index.

Autores	Natalia Casado-Sanz, Begoña Guirao, Antonio Lara Galera, Maria Attard						
Título	Investigating the risk factors associated with the severity of the pedestrians injured on Spanish crosstown roads						
Revista	<i>Sustainability</i> – MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute (ISSN: 2071-1050)						
Volumen (nº), pág	11(19), 5194						
Fecha publicación	Septiembre 2019						
DOI	https://doi.org/10.3390/su11195194						
2018 JCR Edition	Índice de impacto	2,592	Cuartil	Q2	Apartado	<i>Environmental Sciences</i>	
2018 SJR Edition	Índice de impacto	0,549	Cuartil	Q2	Apartado	<i>Social Sciences</i>	

Autores	Natalia Casado-Sanz, Begoña Guirao, Daniel Gálvez-Pérez						
Título	Population ageing and rural road accidents: Analysis of accident severity in traffic crashes with older pedestrians on Spanish crosstown roads						
Revista	<i>Research in Transportation Business & Management</i> - Elsevier (ISSN: 2210-5395)						
Volumen (nº), pág	30, 100377						
Fecha publicación	Septiembre 2019						
DOI	https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2019.100377						
2018 JCR Edition	Índice de impacto	2,065	Cuartil	Q3	Apartado	<i>Transportation</i>	
2018 SJR Edition	Índice de impacto	0,902	Cuartil	Q2	Apartado	<i>Transportation</i>	

Autores	Natalia Casado-Sanz, Begoña Guirao, Maria Attard						
Título	Analysis of the risk factors affecting the severity of traffic accidents on Spanish crosstown roads: The driver's perspective						
Revista	<i>Sustainability</i> – MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute (ISSN: 2071-1050)						
Volumen (nº), pág	12(6), 2237						
Fecha publicación	Marzo 2020						
DOI	https://doi.org/10.3390/su12062237						
2018 JCR Edition	Índice de impacto	2,592	Cuartil	Q2	Apartado	<i>Environmental Sciences</i>	
2018 SJR Edition	Índice de impacto	0,549	Cuartil	Q2	Apartado	<i>Social Sciences</i>	

BLOQUE II: ANTECEDENTES

CAPÍTULO II.1 LA SEGURIDAD VIAL Y SU EVOLUCIÓN EN EL MUNDO

En este primer capítulo se pretende poner de manifiesto una exposición general, a modo de introducción, acerca del serio problema social que protagoniza la siniestralidad vial en la sociedad actual, analizando la seguridad vial desde una perspectiva global, mencionando las diferentes medidas políticas adoptadas en el transcurso de los años, así como las cifras de accidentalidad, su evolución y tratamiento a nivel mundial, europeo y nacional. A día de hoy, la seguridad sigue siendo un tema de actualidad. A menudo este tema es tratado en los medios de comunicación cuando se produce un accidente grave o mortal, en situaciones de emergencia ante fenómenos meteorológicos o sencillamente en las operaciones salida y retorno.

En primer lugar, se abordarán las generalidades de la accidentalidad vial, donde se expondrán los diferentes factores de riesgo que contribuyen en la posibilidad de tener un accidente de tráfico, las clases de accidentes de tráfico y las diferentes fases por las que se pasan cuando tiene lugar un accidente. A continuación, se examina la magnitud y el impacto de los accidentes de tráfico y sus víctimas, exponiendo las principales cifras oficiales en el contexto internacional, en Europa y en España. Finalmente, se plantean las principales políticas de seguridad vial vigentes.

1. Generalidades de la accidentalidad vial

1.1. Los accidentes de tráfico

Un accidente de tráfico es el resultado de un proceso en el que intervienen múltiples factores que resultan de una compleja interacción entre el vehículo, la vía y su entorno y el hombre. La utilización compartida de la vía por todos sus usuarios requiere un equilibrio entre las exigencias del entorno y la capacidad de los conductores en el manejo de los vehículos. Cuando este equilibrio se rompe, se produce el accidente de circulación. Para comprender el proceso de producción de un accidente de una manera gráfica debemos considerar los conceptos de exigencias y capacidades. El sistema tráfico, compuesto por el conductor, el vehículo, la vía y los otros usuarios, plantea una serie de exigencias al conductor, de naturaleza diversa y cambiante, a las que debe hacer frente adaptando su capacidad de actuación. Sin embargo, cuando por cualquier motivo esa capacidad de respuesta es inferior o queda por debajo del nivel de exigencias en ese punto, el equilibrio se rompe y da lugar al accidente de circulación. En definitiva, para garantizar la seguridad en la circulación, las capacidades del conductor deben estar por encima de las exigencias de la situación en todo momento. La Gráfica de Blumenthal (DGT, 2015) establece que "si la vía es el escenario y el vehículo es el medio de utilizarla, el hombre como conductor, pasajero o peatón es el protagonista; de su comportamiento, depende en definitiva la seguridad en la circulación" (ver Figura 2).

Figura 2. Gráfica de Blumenthal. Fuente: Dirección General de Tráfico, 2015

1.2. Factores causantes de los accidentes

Existen numerosos factores de riesgo que pueden contribuir en la posibilidad de tener un accidente de tráfico, así como en la gravedad del mismo. Conocer más en detalle todos estos factores ha sido uno de los objetivos de muchas investigaciones a lo largo de muchas décadas, que han servido para pronosticar el riesgo de sufrir un accidente y facilitar orientación a las autoridades competentes para llevar a cabo políticas de seguridad vial. Existen muchos modelos explicativos y teorías que tratan de analizar los factores causantes de los accidentes de tráfico, desde modelos que consideran los accidentes como eventos fortuitos hasta modelos derivados de la teoría epidemiológica, que considera que son producidos por diversas causas y defienden la existencia de una relación entre tres elementos: el conductor, el vehículo y el ambiente.

1.2.1. Factor humano

Tras todo accidente en carretera hay un sinnúmero de posibles factores y circunstancias, pero es incuestionable que el conductor es la principal causa de muchos de ellos. Las causas pueden ser de diferente índole, como pueden ser psíquicas, físicas, incumplimiento de las normas de circulación, deficiencias en la percepción, etc. Podemos distinguir dos grupos, los que son

consecuencia de un comportamiento que se refleja en infracciones a las normas y señales que regulan la circulación, y los que son consecuencia de un estado psicofísico. Entre los factores que favorecen la accidentalidad y que dan lugar a accidentes causados por un fallo humano son:

La distracción.

Uno de los elementos intrínsecos que interviene con mayor frecuencia en los accidentes de tráfico es la distracción, que puede ser tanto del conductor como de los peatones o pasajeros. Se define como aquel estado psicológico de dispersión mental que impide temporalmente a una persona prestar la debida atención a las cualidades del objeto. Mientras se conduce surgen multitud de acciones en el interior del vehículo que a priori pueden parecer intrascendentes, como puede ser manipular los equipos de música, consultar el teléfono móvil, buscar algo en la guantera, consulta de mapas, etc., pero que hacen que nos distraigamos y tengamos que alejar la vista de la carretera. Además, también podemos encontrar otros factores de distracción en el exterior del vehículo, como puede ser el paisaje, o incluso otros factores externos que hacen que se reduzca nuestra concentración durante la conducción. En España, en 2018, se produjeron 18.591 accidentes como consecuencia de una distracción al volante, un 26% del total, en los cuales fallecieron 446 personas y 1.983 resultaron heridas de gravedad. A continuación, en la Figura 3, se muestran los resultados de una encuesta europea sobre las actitudes de seguridad de los usuarios de la carretera, realizada en el proyecto ESRA. Los resultados revelan que la mayoría de los encuestados reconocen que hablar por el teléfono móvil mientras se conduce tiene efectos negativos en la conducción, con el consecuente incremento del riesgo de tener un accidente. Sin embargo, pese a que son conscientes de ello y perciben el riesgo, una gran parte de los conductores ha declarado que lo utiliza, tal y como se observa en el gráfico.

Figura 3. Actitudes de seguridad declaradas por los usuarios de la carretera en una encuesta europea realizada en 2015. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Trigoso et al., 2016

Telefonía móvil.

Muchos conductores usan sus teléfonos inteligentes para leer o enviar mensajes mientras están al volante, una conducta que implica distracción y riesgo para la conducción. Diversos estudios señalan que tras una conversación de un minuto y medio por teléfono, incluso con manos libres, el conductor deja de percibir el 40% de las señales, su velocidad media baja un 12%, su ritmo cardíaco se acelera bruscamente y la capacidad de reacción disminuye. Además, se ha demostrado que el uso de teléfonos durante la conducción multiplica por cuatro el riesgo de sufrir un accidente. Una encuesta reciente (BP, Castrol y RACE, 2015) realizada en 15 países europeos sobre smartphones y conducción revela que en nueve países (Finlandia, Francia, Italia, Suiza, Luxemburgo, Portugal, Holanda, República Checa y España) es considerado un problema de seguridad vial importante. Algunos de los efectos negativos que produce la telefonía móvil son: interferencia en el manejo del vehículo, aumento de las distracciones, pérdida de la noción de la situación del vehículo respecto al tráfico, desvío de la trayectoria del vehículo, velocidad

anormalmente reducida, aumento del tiempo de reacción, reducción de la distancia de seguridad ante cualquier emergencia, paso inadvertido de señales de tráfico, etc.

La velocidad.

Otro de los factores de riesgo que está directamente relacionado con gran parte de los accidentes de tráfico es la velocidad excesiva o inadecuada debido a que potencia todos los fallos humanos en la conducción. Se estima que este factor de riesgo está vinculado directamente con uno de cada cinco accidentes con víctimas. La velocidad influye de cuatro maneras en la ocurrencia de accidentes de tráfico. Por un lado, aumenta la distancia recorrida por el vehículo desde el momento en que el conductor detecta una emergencia hasta que reacciona. Por otro lado, también aumenta la distancia necesaria para detener el vehículo desde que se reacciona ante una emergencia. Además, el exceso de velocidad también aumenta la gravedad del accidente de forma exponencial. Este hecho se explica con las leyes de la física: cuando un vehículo se encuentra en movimiento, almacena energía cinética. Esta energía se incrementa en función del peso y de la velocidad del vehículo. Un exceso de unos pocos kilómetros por hora hace que se acumule una gran cantidad de energía extra. Si la velocidad se multiplica por dos, la energía cinética es cuatro veces mayor y si la velocidad se triplica, la energía cinética será ya nueve veces mayor. Para hacernos una idea, una colisión de un vehículo a 50km/h equivale a caer con él desde un tercer piso, mientras que alcanzar la velocidad de 180km/h supone un salto de treinta y seis pisos. Igualmente, a 50 km/h el riesgo de sufrir lesiones graves para un pasajero del asiento delantero es tres veces mayor que a 30 km/h y a 65 km/h el riesgo es cinco veces mayor. Finalmente, la última de las cuatro formas es que en colisiones a alta velocidad, se reduce la efectividad de dispositivos de seguridad, como por ejemplo los air bags. Por otro lado, no hay que olvidarse de que una velocidad excesiva también influye en gran medida en la mortalidad de los peatones y ciclistas. Tan sólo un 5% de los peatones atropellados fallecen cuando el vehículo circula a 30km/h. En cambio, cuando la velocidad alcanza los 50km/h, la proporción de fallecidos es del 50%. Por otro lado, cuando la velocidad alcanza los 80km/h, las posibilidades de sobrevivir por parte del peatón son prácticamente nulas (ver Figura 4). Además, a partir de los 30km/h y principalmente entre la franja comprendida entre los 40 y 55km/h, la probabilidad de que un peatón sufra una invalidez permanente es realmente significativa.

Figura 4. Riesgo de fallecimiento de un peatón en función de la velocidad de colisión de un vehículo. Fuente: Organización Mundial de la Salud, 2004

Asimismo, las altas velocidades exigen una mayor atención del conductor que, constantemente, tiene que adecuar la velocidad a las características de la vía, a las condiciones meteorológicas y a las situaciones cambiantes del tráfico. Además, a mayor velocidad, se reducen las capacidades de respuesta del conductor y mayor será la distancia de frenado, la distancia de reacción y la distancia de separación. Por todo ello, las limitaciones de velocidad son una herramienta importante para lograr reducir las tasas de accidentalidad.

El alcohol y las drogas.

El alcohol y las drogas son otros de los factores de riesgo en la conducción, relacionado con un elevado número de accidentes de tráfico en las carreteras y las ciudades. En alcohol está implicado en el 30-50% de los accidentes con fallecidos, siendo la causa de 1,2 millones de víctimas mortales en el mundo y entre 20 y 50 millones de heridos graves. Tiene un efecto tóxico hacia el sistema nervioso y ejerce un efecto adormecedor sobre algunas de sus funciones, por lo que los reflejos se retardan y la visión se hace menos nítida. Además, cabe destacar que uno de los colectivos con mayor riesgo de accidentes provocados por el alcohol es el de los jóvenes y, concretamente, los jóvenes con poca experiencia al volante. Por este motivo, hay que prestar especial atención a este factor de riesgo. Un conductor bajo los efectos del alcohol infravalora la influencia que esta sustancia tiene sobre su organismo, asume mayores riesgos, es menos prudente y comete más infracciones.

Desde la década de los años treinta existe evidencia científica sobre la relación existente entre el consumo de alcohol y el riesgo de accidente de circulación. En los años sesenta, un estudio realizado por Borkenstein et al. (1974) en Estados Unidos, demostraron que la conducción con 0,5 gramos de etanol por litro de sangre supone casi el doble de probabilidad de sufrir un accidente de circulación respecto a la conducción sin ingestión de alcohol. Álvarez y del Río (2001) también demostraron que la probabilidad de ser responsable de un accidente aumenta cuanto mayor es la tasa de alcoholemia (ver Figura 5).

Figura 5. Probabilidad de ser responsable de un accidente mortal en función de la tasa de alcoholemia. Fuente: Álvarez, F. J. y del Río, M.C., 2001

Con respecto a las drogas, la mayoría de las drogas de abuso alteran gravemente las capacidades para conducir un vehículo con seguridad, por lo que aumentan el riesgo de sufrir un accidente. Afortunadamente, el consumo de drogas no está tan extendido como el del alcohol. En torno a un 10% de los accidentes de mayor gravedad están relacionados con el consumo de estas sustancias. El cannabis es la droga ilegal más consumida en España, seguida de la cocaína y el éxtasis. Las drogas se clasifican en tres grandes grupos: depresoras, estimulantes y perturbadoras. Las drogas depresoras menguan las funciones del sistema nervioso central, producen una alteración de la percepción que hace que se perciban las señales y situaciones del tráfico de forma incorrecta. Además, hacen que sea más fácil sufrir una distracción o dormirse al volante y que el conductor tenga una falsa sensación del control. Por otro lado, las drogas estimulantes aceleran el funcionamiento del cerebro y dan lugar a un estado de activación elevada, provocando que el conductor se comporte de manera impaciente e impulsiva, disminuyendo la sensación de fatiga y haciendo que sobrevalore sus capacidades. Finalmente, las drogas perturbadoras alteran el cerebro, provocando una disminución de los reflejos y la coordinación motora, estados de conciencia alterados y que el conductor sufra alucinaciones.

Los conductores noveles.

El prototipo de los conductores noveles suele ser una persona joven y con muy poca experiencia, cosa que se traduce en una aceptación del riesgo importante. Numerosos estudios de accidentalidad indican que en los adolescentes se producen los mayores índices de accidentes mortales y muy frecuentemente se suelen producir a las salidas de las discotecas los fines de semana, por la ingestión de drogas y alcohol.

La compensación del riesgo.

Todas las personas adaptamos nuestro comportamiento para optimizar la relación entre la satisfacción de sus deseos y los riesgos que comporta satisfacerlos. Si cambia el nivel del riesgo que percibe, modificará consecuentemente su comportamiento para alcanzar de nuevo una posición óptima. A este fenómeno psicológico se le denomina compensación del riesgo. Cada conductor establece su propio balance subjetivo entre los beneficios que obtiene de una forma de conducción determinada, como pueden ser el tiempo de viaje, las sensaciones a bordo del vehículo, etc., y el riesgo que percibe asociado a esa forma de conducción. En definitiva, procura optimizar su propio balance entre beneficios y riesgos, adoptando la forma de conducir que a su juicio es la más idónea.

Comportamiento incorrecto de los peatones.

Otra causa que puede dar lugar a un accidente es el comportamiento incorrecto de los peatones. La forma más común de este tipo de accidentes es el atropello. Este tipo de accidente produce al menos una víctima, el peatón, que es el elemento más frágil y vulnerable. Por esta razón se requiere toda la atención del conductor. Los comportamientos incorrectos que pueden tener lugar son: irrumpir la vía antirreglamentariamente sin prestar atención al tráfico, cruzar fuera de la zona señalizada para ello, cruzar la calzada infringiendo la señalización, subir o bajar de un vehículo sin prestar atención al tráfico, etc.

Estado psicofísico del conductor.

Para poder garantizar la seguridad en la conducción, el conductor debe permanecer siempre atento para poder percibir los estímulos que llegan del entorno y de este modo poder valorarlos y transformarlos en decisiones adecuadas al tráfico de cada momento. Si dejamos que el nivel de atención disminuya, se reducirá de forma paralela la capacidad de respuesta, resultando de esta situación una conducción insegura. La conducción, además de una actividad física, es una actividad psíquica. Están implicados una serie de procesos psicológicos que influyen en las tomas de decisiones y, por lo tanto, en el comportamiento del conductor al volante. Las principales causas que deterioran y alteran el estado psicofísico del conductor, cuya incidencia en la producción de accidentes está completamente demostrada, son las siguientes: la desatención o distracción, el alcohol y las drogas, el sueño, la somnolencia y la fatiga. Por otro lado, el nivel de capacidad del conductor vendrá determinado por los siguientes factores: el estado físico y psíquico, el nivel de vigilancia, el conocimiento de la normativa y la competencia técnica.

El uso del cinturón de seguridad y el casco.

En cuanto a las motocicletas, el 3% de este grupo de usuarios fallecidos en vías interurbanas no llevaba casco. Con respecto a los ciclomotores fallecidos, 8 de 34 no utilizaban casco en vías interurbanas. Si comparamos estos datos de 2014 con los datos del año anterior, se observa un descenso del número de fallecidos. En lo que se refiere al cinturón de seguridad, en las vías interurbanas en el año 2014, el 23% de los fallecidos usuarios de turismos y furgonetas no lo llevaban, mientras que en vías urbanas no lo usaban 23 de los 76 fallecidos. En autopistas y autovías prácticamente todos los ocupantes lo utilizaron (96% en 2012). El no uso del cinturón en trayectos cortos puede afectar a la accidentalidad en travesías.

1.2.2. Factor vehículo

El vehículo interviene de manera decisiva en el resultado final de las decisiones adoptadas por el conductor. Si el vehículo no se encuentra en condiciones para dar una respuesta precisa y eficaz a las órdenes que le da el conductor, el nivel de exigencias superará al de las capacidades y se producirá el accidente. Por este motivo, es imprescindible seguir el plan de mantenimiento indicado por el fabricante, así como pasar las correspondientes inspecciones. La gran mayoría de los accidentes producidos por un fallo mecánico podrían haberse evitado con un mantenimiento adecuado. Este factor es la tercera causa de los accidentes de tráfico. Actualmente, la edad media del parque automovilístico de España, sin contar ciclomotores, ha alcanzado los 14 años (DGT, 2018). Asimismo, el correcto mantenimiento de un vehículo contribuye decisivamente a asegurar unas condiciones de seguridad adecuadas a lo largo de la vida útil del mismo. En 2014, el porcentaje de vehículos implicados en accidentes con víctimas en vías interurbanas con la inspección caducada en el momento del accidente oscila entre un 1%, en los autobuses, y un 11%, en los camiones hasta 3.500 kg.

1.2.3. Factor vial-ambiental

La mejora de las infraestructuras y el esfuerzo que actualmente están realizando los fabricantes de automóviles para mejorar la seguridad de los vehículos, ha dado lugar a una disminución del porcentaje de siniestros de forma considerable. El aumento de los kilómetros de autovías abiertas al tráfico está relacionado con la reducción del número de víctimas. Las exigencias del entorno están integradas por unos elementos fijos que son la vía y su configuración geométrica (rectas, curvas, cambios de rasante, pasos a nivel, adherencia, etc.); la señalización (señales verticales, semáforos, marcas viales, etc.); obstáculos laterales (árboles, pretilas, etc.) y por unos elementos cambiantes o en movimiento como son los otros vehículos de motor que participan en el tráfico (turismos, camiones, motocicletas, ciclomotores, etc.), los ciclistas, los peatones, los animales, los vehículos de tracción animal, etc. Entre los distintos factores influyentes, podemos destacar: los controles de acceso, la intensidad de tráfico, la velocidad, la sección transversal, el trazado en planta y alzado, las intersecciones y el estado del pavimento.

1.3. Clases de accidentes de tráfico

Existen numerosas clasificaciones de los accidentes de tráfico, dependiendo de los diferentes criterios de clasificación. Los criterios comúnmente utilizados son los siguientes:

Por su situación:

Dependiendo del tipo de vía donde tenga lugar el accidente, los accidentes de tráfico se pueden clasificar en:

- Urbanos: los que tienen lugar en una calle o vía urbana comprendida dentro del casco de las poblaciones, como pueden ser las travesías.
- Interurbanos: los que se originan en una vía interurbana. Se pueden subdividir, a su vez, en función de la atención al tipo de carretera o considerando el trazado.

Por sus resultados:

En función de las consecuencias del accidente y del estado de salud de la víctima, los accidentes de tráfico se pueden clasificar en:

- Mortales: cuando tiene lugar el fallecimiento de una o más personas.
- Con heridos: cuando únicamente causan lesiones a alguno o algunos de los ocupantes de los vehículos implicados.
- Con daños materiales: cuando sólo ocasionan perjuicios en la propiedad.

Por el número de vehículos implicados:

Se pueden clasificar dos tipos:

- Simples: aquellos accidentes en los que interviene una sola unidad de tráfico, entendida ésta como toda persona que haga uso de la vía o sin vehículo.
- Complejos: son aquellos que presentan dos o más unidades de tráfico implicadas. Dentro de este tipo podemos distinguir los atropellos y los accidentes en cadena.

Por el modo en que se produce:

- Colisiones: encuentros violentos entre dos o más vehículos en movimiento, pudiendo dividirse en: frontales, embestidas, colisiones reflejas, etc.
- Choques: se produce cuando el vehículo topa contra un elemento fijo de la vía, como árboles o vallas o cualquier otro elemento de la infraestructura.
- Salidas de la vía: tiene lugar cuando un vehículo o parte del mismo se sale de la calzada por causas ajenas a la voluntad del conductor. Pueden ser con o sin vuelco.
- Atropellos: cuando se producen atropellos de un turismo con un peatón, un animal, una bicicleta o un ciclomotor.

Accidentes con características especiales:

Este grupo engloba aquellos accidentes que no se ven reflejados en los apartados anteriores, pero que presentan unas características especiales (incendios, explosiones, etc.).

1.4. Fases del accidente

El accidente es un proceso dinámico, que se desarrolla en el espacio y en el tiempo en base a puntos o zonas y momentos donde los hechos se producen. Cuando se produce un accidente de tráfico, se deben investigar cada una de las fases individuales de la cadena de sucesos. Las posiciones estarán compuestas de dos factores: tiempo y espacio.

Fase de percepción

La fase de percepción hace referencia al lugar y al momento en el que el conductor se percata de un peligro inminente en la carretera. Se inicia en el momento y lugar donde se presenta la situación que suscita el accidente de tráfico pudo ser percibida por una persona normal atenta (Punto de percepción posible o PPP) y el momento y lugar de percepción real (PPR) (DGT, 2015). Suele deberse a un obstáculo presente en la calzada o bien una reacción imprevista por parte de nuestro vehículo, el cual amenaza con salirse de la vía. Se compone de dos posiciones:

- Posición de percepción real (PPR): punto que el conductor percibe por primera vez que el peligro puede desembocar en un accidente.
- Punto de percepción posible (PPP): punto en el que un conductor "sin características especiales" debería percibir que el peligro implica un riesgo (DGT, 2015).

Fase de decisión

Aquella en la que el conductor o peatón reaccionan ante la circunstancia anormal e inician la ejecución de la maniobra de evasión para evitar el accidente. El tipo de reacción que el conductor tenga en el momento en que se produzca la amenaza en la carretera influirá de manera directa en la maniobra realizada y en las probabilidades de que se produzca una colisión.

- El punto de decisión (PD): momento en que el implicado inicia la maniobra evasiva.
- El punto clave (PCL): es el momento en que el accidente ya no es evitable. Puede coincidir con el punto de percepción real, en cuyo caso no habrá ni tiempo ni espacio para la maniobra evasiva.
- Maniobras de evasión: las maniobras de evasión pueden clasificarse en simples pasivas, simples activas o complejas

Fase de conflicto

La fase de conflicto es la culminación del accidente. El conflicto comienza en el punto en el que el conductor se apercibe del problema y termina con la solución del mismo.

- Zona de conflicto: espacio donde existe la posibilidad de que ocurra el accidente.
- Punto de conflicto: es el momento en que se consuma el accidente.
- Posición final: es la posición inmóvil que adoptan los vehículos, personas y objetos una vez se ha producido el accidente.

Hyden, en 1987 (Hyden, 1987) propuso la idea de una pirámide de seguridad (ver Figura 6), que representa la gravedad de los acontecimientos. La base de esta pirámide consiste de las situaciones que son más frecuentes y no presentan un riesgo excesivo, mientras que por encima de estas situaciones se presentan los casi accidentes. La cumbre de la pirámide son los accidentes. Así pues, se concluye de este modelo la idea de que los accidentes, los cuasi-accidentes y los conflictos son parte del mismo fenómeno, y se distinguen solamente según su mayor o menor gravedad. Asimismo, existe una frecuencia progresivamente menor de estos eventos conforme se incrementa el nivel de gravedad.

Figura 6. Relación general de eventos elementales para la ilustración de la interacción entre usuarios de la carretera.
Fuente: Hyden, 1987

1.5. Sistema de indicadores para la seguridad vial

Un indicador es un dato o conjunto de datos objetivos u objetivados por procedimientos adecuados, normalmente análisis estadístico, que ofrece información acerca de un atributo de interés de un fenómeno físico, social, económico o de otra naturaleza (DGT, 2011). Un conjunto estructurado de indicadores constituye un sistema de indicadores, cuyo objetivo es ofrecer un conocimiento veraz de los valores que adquieren las diversas variables que intervienen en un instante determinado del fenómeno que se pretende analizar o evaluar. Las diferentes aplicaciones que pueden ser de gran interés son:

- Realizar el seguimiento de la evolución de las variables que representan.
- Evaluar el impacto de acciones encaminadas a la mejora de la seguridad u otros factores de influencia, sobre la variable representada por el indicador.
- Realizar estudios comparativos con las condiciones de seguridad vial obtenidos en otros territorios, siempre con indicadores y metodologías homogéneas.

Los indicadores más empleados son los indicadores de actividad, los indicadores de nivel de seguridad, los socioeconómicos, los indicadores de exposición y los indicadores de resultado.

2. La seguridad vial en el contexto internacional

2.1. Las principales cifras de la siniestralidad vial en el mundo

La Organización Mundial de la Salud (OMS), en su último informe publicado en el año 2018 acerca de la situación global en seguridad vial, alerta de que la siniestralidad vial sigue

siendo un problema de magnitud global: alrededor de 1,35 millones de personas mueren cada año como consecuencia de un accidente de tráfico y entre 20 y 50 millones de personas sufren traumatismos no mortales (OMS, 2018). Además, constituyen la primera causa de muerte entre el grupo de edad de los jóvenes (15-29 años), lo que da lugar a un enorme impacto emocional, social y económico, debido principalmente a la pérdida de años de vida productivos. Se estima que el coste de los heridos en accidentes de tráfico repercute entre un 1 y 2% del Producto Interior Bruto de un país, según los datos de este informe.

Hasta hace unas pocas décadas, la batalla contra los accidentes de tráfico no se encontraba en la agenda política y social, a pesar de las altas cifras ya nombradas anteriormente. Estas cifras a día de hoy siguen una tendencia creciente, mayoritariamente en países de ingresos medios y bajos, en los que las tasas de siniestralidad duplican a los países más desarrollados. La causa principal es el rápido incremento de la motorización en los países emergentes que no ha ido de la mano de políticas de reducción de accidentes y mejora de la seguridad vial. En este contexto fue aprobada la resolución 64/225 por parte de la Asamblea General de las Naciones Unidas, que ponía en marcha la Década de Acción en Seguridad Vial en el periodo 2011-2020 con el fin de lograr una reducción de las cifras de siniestralidad vial en el mundo. El planteamiento se basaba en cinco pilares fundamentales: gestión de la seguridad vial, vías de tránsito y movilidad más seguras, vehículos más seguros, usuarios de vías de tránsito más seguros y respuesta tras los accidentes.

Por otro lado, con respecto a la recopilación de las cifras de siniestralidad en el mundo, es importante destacar que únicamente los países más desarrollados poseen un sistema de recogida de datos que aseguran una recolección completa de la totalidad de los accidentes que se producen en sus vías públicas. Según la OMS en 2018, un total de 175 países miembros colaboraron con la aportación de datos de accidentalidad para elaborar el informe de este mismo año. No obstante, es importante reseñar que cerca de la mitad de estos países admitieron que se trataba de datos parciales o incompletos, por lo que cualquier cifra debe considerarse con diligencia, teniendo en cuenta las dificultades existentes. A continuación, en la Figura 7 se muestra el ratio de fallecidos por cada 100.000 habitantes en las diferentes regiones del mundo. Como se puede observar, existen grandes diferencias entre las regiones más y menos desarrolladas, como puede ser África con una tasa de 26,6 fallecidos por 100.000 habitantes, frente a los ratios de Europa que alcanzan un valor de 9,3 víctimas mortales por cada 100.000 habitantes, casi un tercio menos.

Figura 7. Tasas de fallecidos en accidentes de tráfico por cada 100.000 habitantes por regiones. Comparación entre los años 2013 y 2016. Fuente: Organización Mundial de la Salud, 2018

En lo referente a los tipos de usuarios, las cifras globales de la accidentalidad muestran que el mayor número de víctimas mortales se registraron en conductores o pasajeros de turismos, representando un 29% del total de fallecidos. El siguiente grupo fueron los usuarios de motocicletas o ciclomotores, que se estimaron en un 23% de las víctimas fallecidas. El 23% fueron peatones y el 3% ciclistas. Por tanto, prácticamente la mitad de las víctimas mortales fueron usuarios vulnerables. A continuación, en la Figura 8 se pueden observar los porcentajes aproximados de los diferentes usuarios afectados en todas las regiones del mundo.

Figura 8. Distribución de las víctimas mortales en todas las regiones del mundo en función del tipo de usuario.
Fuente: Organización Mundial de la Salud, 2018

Alrededor del 93% de los fallecidos por accidentes de tráfico ocurren en países de bajos y medios ingresos, que representan el 85% de la población mundial y el 60% del parque de vehículos en el mundo (ver Figura 9). Estos países muestran una alta proporción de víctimas mortales en relación a su nivel de motorización (OMS, 2018). Con respecto a la edad, las cifras muestran que el grupo de los jóvenes (15-44 años), suponen el 59% del total de fallecidos.

Figura 9. Proporción de población, fallecidos por accidentes de tráfico y vehículos por categorías de ingresos de los países, 2016. Fuente: Organización Mundial de la Salud, 2018

Finalmente, en cuanto a las estadísticas en el ámbito global sobre accidentes de tráfico, resulta relevante destacar la base de datos internacional de accidentes de tráfico, denominada International Road Traffic Accident Database (IRTAD). Esta iniciativa se creó en el año 1988 en el seno de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD), como una herramienta para disponer de una base de datos de accidentes de tráfico a nivel internacional, consolidada y actualizada, que permita a los investigadores de los diferentes países analizarlos con el fin de lograr reducir el número de víctimas. Este registro de accidentes contiene datos validados y actualizados de 32 países de todo el mundo. Hoy en día, IRTAD no sólo es una base de datos, sino que se ha conformado como un grupo de trabajo, coordinado por la propia OECD

y por el ITF (International Transport Forum). Los datos incluyen información de seguridad y tráfico desde el año 1970, agregados por país y año. Está mundialmente reconocida por su fiabilidad y se considera una base empírica para las comparaciones internacionales y las políticas de seguridad vial más efectivas (ITF-OECD, 2018).

2.2. Las políticas de seguridad vial en el contexto internacional

Las políticas de seguridad vial en el contexto internacional abordan los accidentes de tráfico como una prioridad de salud pública. En el primer trimestre de 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas declaró, a través de la resolución 64/255 de 1 de marzo de 2010, el Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020 con el fin de, en una primera etapa, afianzar la estabilidad en las cifras de accidentalidad, para posteriormente poner en marcha un conjunto de acciones destinadas a reducir las mismas, marcándose como año horizonte el año 2020. Este programa pone rápidamente en marcha el desarrollo de planes de acciones a nivel local y nacional, brindando un marco común en beneficio de actividades coordinadas en el contexto internacional. Este ambicioso proyecto impulsa a los países a realizar actividades basadas en cinco pilares fundamentales, tal y como se puede observar en la Figura 10.

Figura 10. Principales pilares del proyecto impulsado por el Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de la Asamblea General de las Naciones Unidas, 2010

El seguimiento y la evaluación del grado de cumplimiento del Decenio de Acción para la Seguridad Vial se realiza a través de tres procedimientos diferentes. En primer lugar, se lleva a cabo el seguimiento de los indicadores definidos para cada uno de los cinco pilares anteriormente descritos. En segundo lugar, se realiza un rastreo de los hitos vinculados a dicho programa. Finalmente, en último lugar, se realiza la evaluación de los objetivos y las cifras de accidentalidad alcanzadas a la mitad y al final del periodo, ofreciendo de forma anticipada un resumen de la situación para poder llevar a cabo, en caso necesario, medidas más enérgicas y contundentes.

Unos años más tarde, en 2014 la Organización Mundial de la Salud publicó el manual *Fortalecimiento de la legislación de seguridad vial: Manual de prácticas y recursos para los países* (OMS, 2014). Este documento ofrece un itinerario para conseguir una legislación global atendiendo a cinco factores de riesgo de los traumatismos causados por accidentes de tráfico: la velocidad, el cinturón de seguridad, los sistemas de retención infantil, la conducción bajo los efectos del alcohol y el casco de motociclista.

Posteriormente, en el último trimestre del año 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas aprueba la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015), un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad. Plantea 17 objetivos con una temática muy amplia y un total de 169 metas de aplicación universal.

Por un lado, en el objetivo número 3, que se ha denominado “*Salud y bienestar*” y cuya descripción es “*Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades*”, incluye un apartado que hace referencia a los accidentes de tráfico (la meta 3.6), que propone reducir a la mitad el número de víctimas mortales y lesiones en el mundo provocadas por los accidentes de tráfico para el año 2020. Por otro lado, en el objetivo número 11, que se ha definido como “*Ciudades y comunidades sostenibles*” y cuya descripción es “*Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles*”, la meta 11.2 plantea proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial para 2030.

3. La seguridad vial en la Unión Europea

3.1. Las principales cifras de la siniestralidad vial en Europa

A pesar de que el número de fallecidos en accidentes de tráfico a nivel global sigue en aumento y que los accidentes de tráfico siguen siendo la principal causa de muerte entre el grupo de los jóvenes (5-29 años) en el mundo, en comparación con la situación mundial, Europa presenta cifras muy positivas, gracias a las medidas firmes que lleva aplicando a escala europea, nacional y regional. El último informe (Comisión Europea, 2018), que hace referencia a las cifras de 2018, apunta a que las carreteras europeas, con un promedio de 49 muertes por millón de habitantes, son las más seguras del mundo, frente a las 174 muertes por millón de media en todo el mundo. Además, en el periodo comprendido entre los años 2001 y 2010, el número de fallecidos disminuyó en un 43%, mientras que en la última década, entre 2010 y 2018 se redujo otro 21%. Tal y como se puede observar en la Figura 11, en el año 2018 fallecieron en Europa un total de 25.100 personas y 135.000 víctimas resultaron heridas de gravedad. Además, hasta el año 2013 el número de víctimas mortales había ido decreciendo progresivamente, pero este avance se ha visto estancado en los últimos años, alejándose del objetivo marcado a medio plazo consistente en reducir a la mitad el número de fallecidos de accidentes de tráfico entre 2010 y 2020 (ver Figura 11). Este hecho pone de manifiesto la necesidad de reaccionar y proponer una acción rápida por parte de los Estados miembros para cumplir con los requisitos fijados por los planes estratégicos de la Unión Europea. La Unión Europea ha puesto en marcha el objetivo Visión Cero y el enfoque del Sistema Seguro, con el único fin de lograr suprimir las muertes y las lesiones graves de las carreteras europeas. Para ello, colabora estrechamente con las distintas autoridades de seguridad vial de sus países miembro para llevar a cabo iniciativas nacionales, establecer objetivos comunes y concentrarse en todos los factores que influyen en los accidentes: infraestructura, seguridad de los vehículos, respuesta de los servicios de emergencia, etc.

Figura 11. Evolución del número de víctimas mortales de accidentes de tráfico de la Unión Europea en relación al objetivo establecido en el periodo 2001-2020. Fuente: Comisión Europea, 2018

Por otro lado, con respecto al número de accidentes y de heridos, en la Figura 12 se puede observar que el número de fallecidos decrece a un ritmo superior al de accidentes y heridos en la Unión Europea. Estas cifras revelan una mejora en el funcionamiento del sistema de transporte global (mejores vehículos, mejor asistencia, funcionamiento de las medidas aplicadas, etc.), sin embargo, debería ir acompañado de una reducción similar en el número de accidentes.

Figura 12. Número anual de fallecidos, heridos graves y heridos leves en la Unión Europea en el periodo 2007-2016. Fuente: Comisión Europea, 2018

Asimismo, se vio afectada una gran cantidad de usuarios vulnerables: peatones, ciclistas, motoristas y ancianos, en mayor medida en las travesías urbanas, pueblos y núcleos urbanos. Es en estas localizaciones donde la Comisión Europea y el conjunto de partes colaboradoras deben prestar especial interés: en el año 2017, el 8% de los fallecidos tuvieron lugar en autopistas, un 37% de las víctimas perdieron la vida en zonas urbanas y un 55% en carreteras locales de ámbito rural. Con cambios demográficos y la tendencia actual hacia la actividad y movilidad sostenible, se espera que estos grupos representen una mayor proporción de usuarios de la carretera en el futuro y requerirá una atención particular. Además de los fallecidos, el foco de la Unión Europea también está en los heridos graves: se estimó que, por cada fallecido en la carretera, cinco personas más resultaron gravemente heridas en 2018, alrededor de 135.000. Además, los usuarios vulnerables representan casi la mitad de los fallecidos que se producen en carretera. Tal y como se observa en la Figura 13, el 22% del total corresponden a peatones, un 14% conductores de motos de gran cilindrada, un 8% ciclistas y un 3% ciclomotores.

Figura 13. Distribución de víctimas mortales por modo de transporte en la Unión Europea, año 2016. Fuente: Comisión Europea, 2018

Por otro lado, con respecto al género de las víctimas fallecidas durante el año 2016 en accidentes de tráfico en la Unión Europea, en la Figura 14 se puede observar que la mayor parte de las víctimas de sexo masculino eran conductores (70% del total de víctimas de sexo masculino), mientras que en el caso de las víctimas de género femenino fueron en su mayoría peatones y pasajeros (65% del total de víctimas de género femenino).

Figura 14. Distribución de fallecidos en función del tipo de usuario y del sexo de la víctima, año 2016. Fuente: Comisión Europea, 2018

Con respecto a la edad de las víctimas, más de 3.000 jóvenes fallecieron en carreteras europeas durante el año 2017, llegando a alcanzar un porcentaje del 14% correspondiente a los jóvenes del grupo de edad comprendido entre 18 y 24 años. Otro de los grupos más afectados fueron los ancianos (mayores de 65 años), cuyo porcentaje se incrementó en un 5% con respecto al año 2010, pasando a alcanzar un 27% en 2017.

Por otro lado, en relación a la distribución de estas cifras entre los diferentes países pertenecientes a la Unión Europea, tal y como se puede observar en la Tabla 1, prácticamente la totalidad de los países están reduciendo sus niveles de siniestralidad vial. Los países que registraron la mayor disminución en 2017 fueron Luxemburgo, Noruega y Eslovenia con una reducción de más del 20%. Sin embargo, el número de fallecidos en carretera aumentó en seis países (España, Hungría, Italia, Portugal, Suiza y Nueva Zelanda) en 2017. Este es el cuarto año consecutivo que Nueva Zelanda y España experimentan un incremento.

En cambio, si tenemos en cuenta el número de fallecidos con respecto al número de habitantes de cada uno de los países miembros (ver Figura 15), los países de la Unión Europea con los mejores resultados de seguridad vial en 2018 fueron el Reino Unido (28 muertes/millón de habitantes), Dinamarca (30 muertes/millón de habitantes), Irlanda (31 muertes/millón de habitantes) y Suecia (32 muertes/millón de habitantes). Los países con una disminución de los fallecidos en carreteras por encima de la media de 2017 a 2018 fueron Eslovenia (-13%), Lituania (-11%), Bulgaria (-9%) y Eslovaquia y Chipre (ambos -8%). Tan sólo dos Estados miembros de la Unión Europea registraron una tasa de mortalidad superior a 80 muertes por millón de habitantes, contra 7 en 2010. Los países con la tasa de mortalidad más alta fueron Rumania (96 muertes/millón de habitantes), Bulgaria (88 muertes/millón de habitantes), Letonia (78 muertes/millón de habitantes) y Croacia (97 muertes/millón de habitantes). En el caso de España, los esfuerzos realizados en seguridad vial le han llevado a una cifra de 40 muertes por millón.

Tabla 1. Evolución del número de fallecidos en accidente de tráfico en la Unión Europea en el periodo 2007-2016, por país. Fuente: Comisión Europea, 2018

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
BE	1.071	944	944	840	862	770	723	727	732	637
BG	1.006	1.061	901	776	656	601	601	660	708	708
CZ	1.221	1.076	901	802	772	742	655	688	734	611
DK	406	406	303	255	220	167	191	182	178	211
DE	4.949	4.477	4.152	3.648	4.009	3.600	3.339	3.377	3.459	3.206
EE	196	132	98	79	101	87	81	78	67	71
IE	338	280	238	212	186	162	188	193	162	186
EL	1.612	1.555	1.456	1.258	1.141	988	879	795	793	824
ES	3.823	3.100	2.714	2.479	2.060	1.903	1.680	1.688	1.689	1.810
FR	4.620	4.275	4.273	3.992	3.963	3.653	3.268	3.384	3.461	3.477
HR	619	664	548	426	418	390	368	308	348	307
IT	5.131	4.725	4.237	4.114	3.860	3.753	3.401	3.381	3.428	3.283
CY	89	82	71	60	71	51	44	45	57	46
LV	419	316	254	218	179	177	179	212	188	158
LT	740	499	370	299	296	302	256	267	242	192
LU	46	35	48	32	33	34	45	35	36	32
HU	1.232	996	822	740	638	606	591	626	644	607
MT	12	9	15	13	16	9	17	10	11	23
NL	709	677	644	537	546	562	476	477	531	533
AT	691	679	633	552	523	531	455	430	479	432
PL	5.583	5.437	4.572	3.908	4.189	3.571	3.357	3.202	2.938	3.026
PT	974	885	840	937	891	718	637	638	593	563
RO	2.800	3.061	2.796	2.377	2.018	2.042	1.861	1.818	1.893	1.915
SI	293	214	171	138	141	130	125	108	120	130
SK	661	606	384	353	325	352	251	295	310	275
FI	380	344	279	272	292	255	258	229	266	258
SE	471	397	358	266	319	285	260	270	259	270
UK	3.059	2.645	2.337	1.905	1.960	1.802	1.770	1.854	1.804	1.860
EU	43.151	39.577	35.359	31.488	30.685	28.243	25.956	25.977	26.130	25.651
Yearly Change		-8,3%	-10,7%	-10,9%	-2,6%	-8,0%	-8,1%	0,1%	0,6%	-1,8%
IS	15	12	17	8	12	9	15	4	16	18
LI	0	1	1	0	2	1	2	-	-	-
NO	233	255	212	208	168	145	187	147	117	135
CH	384	357	349	327	320	339	269	243	253	216

Figura 15. Fallecidos por millón de habitantes en los países de la Unión Europea, 2016 en comparación con 2007. Fuente: Comisión Europea, 2018

Finalmente, cabe destacar que España se encuentra en sexta posición entre los países que más han descendido el número de fallecidos en accidentes de tráfico en la Unión Europea entre 2007 y 2016, muy por encima de la media europea. Sin embargo, con respecto al número de accidentes se encuentra entre los únicos cuatro países que no han logrado reducir los mismos en este periodo, incrementándose en un 2% con respecto al año 2007 (ver Figura 16).

Figura 16. Cambio porcentual en el número de fallecidos y heridos en accidentes de tráfico en la Unión Europea entre 2007 y 2016, por país. Fuente: Comisión Europea, 2018

Estas cifras de fallecidos y heridos gravedad como consecuencia de un accidente de tráfico, no sólo afectan a las propias víctimas, sino a toda la sociedad en su conjunto, dando lugar a unos costes socioeconómicos (administrativos, sanitarios, indemnizaciones, vehículos, etc.) que cada año alcanzan aproximadamente los 120.000 millones de euros en Europa (Comisión Europea, 2018)

Por tanto, tal y como reflejan las cifras de siniestralidad y a pesar de que los pasos realizados hacia el objetivo han sido muy reducidos, resulta imprescindible continuar invirtiendo en mejorar la seguridad vial en las carreteras europeas. La Comisión Europea es conocedora de que el objetivo establecido que consistía en reducir el 50 por ciento el número de fallecidos entre 2010 y 2020 es improbable de conseguir, por lo que ha resuelto aplazarlo a la siguiente década, instaurando el año 2030 como fecha límite. En este nuevo periodo se pondrá en marcha su programa marco que tendrá como eje principal la Declaración de La Valeta sobre seguridad vial, centrado fundamentalmente en fomentar una colaboración más estrecha entre todos los agentes de seguridad vial implicados, una mejor supervisión y financiación específica, mostrando especial interés por la seguridad del vehículo, la gestión de la seguridad de las infraestructuras y finalmente, una movilidad conectada y autónoma. En su marco de política de seguridad vial para el periodo 2021-2030 y el plan de acción estratégico sobre seguridad vial, ambos publicados en mayo de 2018 como parte del paquete 'Europa en movimiento', la Comisión Europea confirma el objetivo a largo plazo de acercarse a cero muertes y lesiones graves en el transporte por carretera para el año 2050.

Finalmente, en lo que respecta a las estadísticas de siniestralidad vial en Europa, resulta relevante mencionar la base de datos comunitaria de accidentes de tráfico con víctimas,

denominada CARE (Community database on Accidents on the Roads in Europe). Esta base de datos, que fue creada acorde a lo dispuesto en la Decisión 97/704/CE del Consejo, de 30 de noviembre de 1993, registra todos los accidentes de tráfico con víctimas en los estados miembros de la Unión Europea desde el año 1991. Esta base de datos tiene un nivel de desagregación más alto que otras bases de datos internacionales. El objetivo de esta base de datos común a todos los países miembro de la Unión Europea es facilitar a los mismos una herramienta consolidada que permita determinar y cuantificar los problemas de seguridad vial de las carreteras europeas, valorar la eficacia de las medidas de seguridad adoptadas y compartir las experiencias entre sus países miembros (Comisión Europea, 2018). Esta base de datos se amplió con el proyecto europeo SafetyNet, que también permitió desarrollar el Observatorio Europeo de Seguridad Vial, denominado en inglés European Road Safety Observatory (ERSO). Este observatorio europeo incluye información sobre datos de exposición de riesgo e indicadores de desempeño de seguridad vial como pueden ser las tasas de empleo del cinturón de seguridad, las velocidades, alcohol y drogas, etc. A día de hoy, este observatorio representa un instrumento fundamental para la monitorización de los avances hacia los propósitos europeos de seguridad vial, así como para determinar las mejores prácticas y asegurar que las medidas aplicadas sean efectivas en la disminución del número de accidentes de tráfico con víctimas.

3.2. Evolución de las políticas de seguridad vial en Europa

La preocupación europea por la seguridad vial tuvo su origen con una Resolución del Parlamento Europeo en 1984 sobre el establecimiento de medidas comunitarias con el objetivo de impulsar la seguridad vial. Hasta ese momento no había sido contemplada más que como un subproducto de políticas comunes sectoriales. Ese mismo año se celebra un consejo en el que se acuerda declarar el año 1986 como “Año Europeo de la Seguridad Vial” (Resolución C 341/1 del Consejo de las Comunidades Europeas, de 19 de diciembre de 1984), estableciéndose un punto de partida para llevar a cabo un programa de medidas dedicadas a la mejora de la seguridad vial en la Unión Europea. Pocos años más tarde, en 1989 la Comisión Europea expone mediante una comunicación denominada “Seguridad Vial, una prioridad para la Comunidad”, un resumen de las medidas llevadas a cabo hasta ese momento y presenta al Consejo una serie de iniciativas legislativas en las que se aprueban la mayor parte de las medidas propuestas desde 1986. Sin embargo, es en 1991 cuando se adopta la Directiva 91/671/CEE, de 16 de diciembre de 1991, relativa al uso obligatorio del cinturón de seguridad y de los sistemas de retención infantil, pasando a considerarse el punto de partida de una política comunitaria de seguridad vial.

A finales de 1989, la Comisión encargó a un comité de expertos independientes un informe sobre el balance de la seguridad vial en Europa y elaborara propuestas para mejorarla. Este comité de expertos estuvo liderado por Christian Gerondeau y en 1991 publicaron el informe que llevó por título “Informe del Grupo de Expertos de Alto Nivel para una política de Seguridad Vial”, comúnmente conocido como “Informe Gerondeau”. Este informe incorporó sesenta medidas técnicas para la mejora de la seguridad vial, incluyendo diferentes campos y prioridades de actuación. Entre estas medidas destacan la estandarización de los límites de velocidad en las autopistas del territorio, jerarquizar las redes viarias y normalizar sus características.

Unos años más tarde, en marzo de 1993 el Parlamento Europeo pone en marcha un programa de seguridad vial (Resolución A3-0014/93 del Parlamento Europeo, de 12 de marzo de 1993), muy similar con la Comunicación presentada por el grupo de expertos un año antes, manifestando su intención de otorgar preferencia a la política de seguridad vial en todos los medios de transporte y en particular, a aquellas intervenciones cuyo fin sea reducir significativamente el número de víctimas. El primer Plan de Acción de Seguridad Vial realiza un análisis del estado actual de la política comunitaria en la materia y de sus antecedentes, así como

una revisión de la legislación existente acerca del vehículo y del comportamiento del conductor. En este plan enuncian un conjunto de medidas legislativas que incluyen los siguientes temas: la limitación de velocidad, alcohol y conducción, los vehículos con alto impacto en la seguridad vial y el control de transporte de mercancías peligrosas. De forme paralela a este acontecimiento, se da paso a una legislación en materia de seguridad vial y se publica en 1992 el primer Libro Blanco de la Comisión sobre el futuro de la política común de transportes (Comunicación COM (92) 494 final, de la Comisión de las Comunidades Europeas, de 2 de diciembre de 1992). Este nuevo libro dio lugar a la apertura del mercado del transporte, beneficiando notablemente al sector y al crecimiento del tráfico en Europa. Gracias a este hito de la seguridad vial europea, se inicia una nueva etapa común en la política de transportes entre los estados miembros, que se continua los años posteriores. En 2001, se publica un nuevo Libro Blanco (ver Figura 17) titulado “La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad” (Comunicación COM 370 de la Comisión de las Comunidades Europeas, de 12 de septiembre de 2001). En esta nueva edición se establece el objetivo de reducir el número de víctimas mortales a la mitad antes de 2010, entre otras muchas propuestas enfocadas al refuerzo de la seguridad vial.

Figura 17. Imagen del Libro Blanco de 2001 (izquierda) y 2011 (derecha). Fuente: Comisión Europea

Siguiendo esta misma línea, dos años después se adopta un programa de acción europeo (Comunicación COM 311 de la Comisión de las Comunidades Europeas, de 2 de junio de 2003) en el que se vuelve a fijar esta misma meta señalada anteriormente: reducir en un 50% el número de fallecidos hasta 2010. Este programa propició que la seguridad vial pasase a ser una de las prioridades de los Estados miembros, los cuales comenzaron a implantar programas nacionales de seguridad vial, trasladando el objetivo europeo de reducción del número de víctimas a sus objetivos propios. Además, aparece el concepto de “responsabilidad compartida” entre los agentes implicados en la seguridad vial, tales como administraciones nacionales, asociaciones, clubes de automovilistas, etc., que comienzan a comprometerse en relación a la adopción de medidas concretas para lograr alcanzar el objetivo común. En esta etapa se publican varias directivas europeas, como la Directiva 2003/20/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de abril de 2003, por la que se modifica la Directiva 91/671/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre el uso obligatorio de cinturones de seguridad en vehículos de menos de 3,5 toneladas; la Directiva 2003/102/CE, de 17 de noviembre de 2003, relativa a la protección de los peatones y otros usuarios vulnerables de la vía pública antes y en caso de colisión con un vehículo de motor; o la Recomendación 2004/345/CE, referida a las buenas prácticas de control del cumplimiento de las normas relativas a la

conducción bajo los efectos del alcohol, a la velocidad y al uso del cinturón de seguridad. Además, también se elaboraron campañas destinadas a los jóvenes, para combatir las elevadas cifras de siniestralidad vial en este grupo de edad y se crearon compromisos entre los diferentes Estados miembro y la industria automovilística para implantar nuevas medidas destinadas a fortalecer la seguridad activa y pasiva.

Posteriormente, en el año 2010 se hacen públicas las orientaciones políticas sobre seguridad vial para el periodo 2011-2020 (Comisión Europea, 2010), un documento en el que se lleva a cabo una valoración de las políticas en materia de seguridad vial realizadas hasta el momento y se analizan las cifras de siniestralidad vial en Europa hasta ese momento. Este nuevo documento tiene como principio fundamental alcanzar el máximo nivel de seguridad vial en la Unión Europea, lograr un enfoque integrado sobre la seguridad vial y respetar la responsabilidad compartida. De nuevo, la Comisión Europea reitera su objetivo de reducir a la mitad el número total de fallecidos en las vías de su territorio para 2020, tomando como referencia las cifras de 2010. Además, establece siete objetivos estratégicos (ver Figura 18). Ese mismo año, se aprueba el Libro Blanco de 2011 (ver Figura 17), que establece diez objetivos para transformar el sistema de transporte en un sistema competitivo y sostenible. Este nuevo libro blanco fija como meta el objetivo de «cero muertes» en carreteras antes de 2050.

Figura 18. Objetivos estratégicos de la Unión Europea. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de la Comisión Europea

Finalmente, en junio de 2019 la Comisión Europea publica un documento de trabajo en el que se establece el marco de la política de la Unión Europea en materia de seguridad vial para el periodo 2021-2030. En dicho documento se analizan las principales cifras de la siniestralidad vial a nivel europeo, así como una evaluación de las orientaciones políticas de la Unión Europea sobre seguridad vial. Asimismo, se establece el marco de las políticas en materia de seguridad vial para la década 2021-2030 basándose en el enfoque del «Sistema Seguro». En este documento se reconoce la baja probabilidad de alcanzar el objetivo actual de reducir a la mitad el número de fallecidos en las carreteras entre 2010 y 2026, dados los resultados en las cifras de los últimos años. Sin embargo, se ratifica en el objetivo a largo plazo de aproximarse a cero muertes en el año 2050. Con respecto a la seguridad del vehículo, se hace hincapié en la posibilidad de que las consideraciones de seguridad tengan mayor importancia en la legislación de contratación pública dentro de la Unión Europea y se evalúa la posibilidad de adaptar la flota existente con Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor. Por otro lado, con respecto a la movilidad conectada y autónoma, se está elaborando un código de conducta que respalde el cumplimiento de las

consideraciones generales de seguridad vial. También se está evaluando cómo mejorar la eficacia de la aplicación transfronteriza de la legislación en materia de seguridad vial.

4. La seguridad vial en España

4.1. Las principales cifras de la siniestralidad vial en España

La Dirección General de Tráfico (DGT), el organismo autónomo responsable de la ejecución de la política vial en las vías de titularidad estatal en España, publica cada año desde 2004 el documento *“Principales Cifras de la Siniestralidad Vial”*. Este informe anual es la publicación de referencia en España relativa a datos de accidentes de tráfico que tienen lugar en nuestro país y permite conocer la evolución de los datos relativos a accidentes y evaluar el impacto de las políticas de seguridad vial adoptadas.

Según fuentes policiales, durante el año 2018, se produjeron en España 102.299 accidentes de tráfico con víctimas, en los que fallecieron 1.806 personas en el momento del accidente o hasta 30 días después del mismo, 8.935 personas resultaron heridas de gravedad requiriendo hospitalización y 129.674 heridos leves no hospitalizados (DGT, 2018). La cifra de accidentes de tráfico con víctimas ha aumentado en 66 con respecto a 2017 y ha habido 24 fallecidos menos, un descenso del 1%. Con respecto a los heridos graves, en 2018 hubo 611 heridos hospitalizados menos, suponiendo una reducción del 6%, mientras que el número de heridos leves aumentó ligeramente, llegando a alcanzar 58 heridos más.

Figura 19. Evolución de los fallecidos en accidentes de tráfico en España durante el periodo 1998-2018. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de la Dirección General de Tráfico, 2018

La evolución del número de víctimas mortales como consecuencia de un accidente de tráfico ha mostrado desde el año 1960 una tendencia ascendente hasta el año 1989, en el que se produce un máximo, con 9.344 fallecidos. Desde ese año, el número de víctimas mortales ha tenido una tendencia negativa hasta alcanzar la cifra mínima de la serie histórica, en el año 2013, con 1.680 fallecidos (ver Figura 19). En el año 2018 se ha producido un leve descenso (1,3%) con respecto al año anterior tras cuatro años sucesivos en aumento (DGT, 2018).

Además, desde el año 1962 es posible discriminar por la gravedad de la lesión de la víctima (heridos hospitalizados y heridos no hospitalizados). Durante toda esta serie de años, la distribución proporcional de los fallecidos, heridos graves y heridos leves ha cambiado notablemente. Tal y como se puede observar en la Figura 20, en 1998 las proporciones

consistieron en el 4% de fallecidos, 24% de heridos hospitalizados y 72% de heridos no hospitalizados. En 2008, las proporciones se redujeron, alcanzando un 2% de fallecidos, 12% de heridos hospitalizados y 86% heridos no hospitalizados. Finalmente, en 2018 la proporción de fallecidos ha descendido al 1%, mientras que la de heridos hospitalizados se ha reducido al 6%.

Figura 20. Evolución de las víctimas de accidentes de tráfico en España durante el periodo 1998-2018. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de la DGT

La siguiente figura recoge (Figura 21), para todo tipo de vías, la evolución del número de víctimas mortales en accidentes de tráfico en función del modo de transporte, en el periodo comprendido entre los años 2010 y 2018. Como se puede apreciar gráficamente, en el año 2018 los colectivos vulnerables (peatones, ciclistas y motoristas) supusieron el 47% de todos los fallecidos (DGT, 2018). Además, se aprecia una tendencia en ascenso en el número de fallecidos que se desplazaban en motocicletas entre los años 2012 y 2018, pasando de representar el 16% de las víctimas mortales al 20% en 2018. Este incremento del 25% es el mayor de entre todos los modos de transporte. Con respecto a los ciclistas, se aprecia un ligero descenso en 2018 con respecto al año anterior (-1%).

Figura 21. Evolución de la distribución porcentual del número de víctimas mortales en accidentes de tráfico según modo de transporte, 2010-2018. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la DGT

En relación a la edad de las víctimas implicadas, la media de edad de los fallecidos en 2018 en accidente de tráfico fue de 50 años, mientras que de los heridos hospitalizados fue de 45 años y de los heridos no hospitalizados 39 años. En los fallecidos, el grupo de edad entre 65 y 74 años ha sido el que ha experimentado un mayor incremento con respecto al año anterior (variación 2018/2017 del 14%). Por el contrario, el que ha experimentado un mayor descenso ha sido el grupo de jóvenes (grupo de edad 25-34 años), en el que se ha logrado reducir los fallecidos en un 11%, pasando de tener 293 víctimas mortales a 261 (ver Tabla 2). Las tasas de fallecidos por millón de población han aumentado en 2018 respecto a 2017 en los grupos de edad 15 a 24 años y de 65 a 84 años, disminuyendo para el resto de grupos de edad (DGT, 2018). Con respecto al sexo, en 2018 fallecieron 1.399 hombres y 407 mujeres como consecuencia de un accidente de tráfico, un 77% y un 23%, respectivamente. La tasa de fallecidos por millón de habitantes atendiendo al sexo ha sido de 61 para los hombres y 17 para las mujeres.

Tabla 2. Evolución de los fallecidos por grupos de edad. España, 2012-2018. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la DGT

Grupos de edad	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Variación 2018/2017	Variación interanual 2009-2018
0 – 14 años	52	46	37	25	28	35	25	-10%	-35%
15 – 24 años	206	163	154	170	198	200	207	4%	-8%
25 – 34 años	298	242	211	236	223	293	261	-11%	-8%
35 – 44 años	350	278	277	271	289	289	301	4%	-5%
45 – 54 años	274	250	298	262	311	291	288	-1%	-3%
55 – 64 años	200	202	216	210	230	246	220	-11%	-2%
65 – 74 años	196	200	188	202	198	191	217	14%	-1%
75 – 84 años	236	206	204	229	210	185	189	2%	-1%
> 85 años	75	76	85	74	105	89	90	1%	20%
Sin especificar	16	17	18	10	18	11	8	-3%	-25%
Total	1.903	1.680	1.688	1.689	1.810	1.830	1.806	-1%	-4%

En lo referente al tipo de vía, a lo largo del año 2018, la mayor parte de los accidentes con víctimas ocurrieron en vías urbanas (63% del total de los accidentes). No obstante, la mayor proporción de víctimas mortales se produjo en las vías interurbanas (73% del total de los fallecidos). Por otro lado, en cuanto a los heridos que requirieron hospitalización, la proporción de estos es similar en vías urbanas e interurbanas, tal y como se puede observar en la Figura 22. Con respecto a la evolución de las víctimas, en las vías interurbanas hasta el año 2013 había habido una reducción en cuanto a fallecidos y heridos hospitalizados, al igual que en las vías urbanas, donde las víctimas mortales presentaban una tendencia negativa hasta 2014. Sin embargo, desde esos mismos años hasta el día de hoy, los fallecidos se han incrementado un 6 y un 11% en las vías interurbanas y urbanas, respectivamente.

Figura 22. Distribución del número de accidentes con víctimas, fallecidos y heridos hospitalizados según el tipo de vía. España, 2018. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la DGT

Según las cifras del balance anual de seguridad 2018 (DGT, 2018), el año 2018 destaca un incremento del 5% de desplazamientos de largo recorrido con respecto al año 2008, así como un aumento del 9% de las matriculaciones de vehículos en este mismo periodo, alcanzando los

34 millones de automóviles. Tal y como se puede observar en la Figura 23, el censo de conductores se ha mantenido constante en esta última década.

Figura 23. Evolución del parque de vehículos, movimientos de largo recorrido, censo de conductores y fallecidos en vías interurbanas de España (2008-2018). Fuente: DGT, 2018

Por otro lado, con respecto a la variación interanual del número de fallecidos entre las distintas Comunidades Autónomas, en el año 2018 se ha producido un descenso con respecto al año anterior en ocho comunidades autónomas: Andalucía, Illes Balears, Castilla-La Mancha, Extremadura, Comunidad de Madrid, Región de Murcia, La Rioja y País Vasco (ver Tabla 3). En las demás comunidades el número de víctimas mortales ha aumentado. En lo que respecta a la tasa de fallecidos por millón de habitantes, la media nacional se ha situado en 39 para el año 2018, observándose que 17 provincias han obtenido una tasa inferior a la nacional y las 20 restantes una tasa superior a la media nacional (ver Figura 24). Estas cifras sitúan a España en la octava posición en comparación con los demás países europeos, situándose su tasa por debajo de la tasa media comunitaria, que actualmente se encuentra en torno a 50 fallecidos por cada millón de habitantes.

Tabla 3. Evolución de las víctimas mortales en accidentes de tráfico por comunidades autónomas. España, 2009-2018. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la DGT

Comunidades autónomas	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Variación 2018/2017	Variación 2010/2018
Andalucía	449	399	327	295	283	287	262	303	305	274	-10%	-5%
Aragón	122	108	86	86	68	77	71	73	80	85	5	-4%
Asturias, Principado	57	64	42	42	46	38	36	35	37	43	6	
Balears, Illes	56	63	50	60	45	50	53	60	68	53	-15	
Canarias	72	76	47	61	48	57	62	71	67	68	1	
Cantabria	30	28	21	14	20	18	22	21	22	23	1	
Castilla-La Mancha	195	172	152	140	120	107	107	118	129	100	-22%	-7%
Castilla y León	270	286	228	189	160	157	181	175	164	176	7%	-5%
Cataluña	417	391	317	336	272	272	291	282	283	326	15%	-3%
Extremadura	95	85	76	62	47	56	54	62	62	51	-11	
Galicia	246	237	186	157	132	139	123	141	117	144	23%	-6%
Madrid, Comunidad	194	157	138	135	130	114	111	121	125	114	-9%	-6%
Murcia, Región de	88	16	71	50	57	61	44	58	85	66	-19	
Navarra, C. Floral de	39	39	28	44	31	41	26	26	29	35	6	
Rioja, La	34	22	22	13	16	11	20	25	26	10	-16	
Comunitat Valenciana	263	213	198	151	141	167	154	180	176	183	4%	-4%
País Vasco	83	75	69	68	63	36	67	56	51	49	-2	
Ceuta y Melilla	4	2	2	0	1	0	5	3	4	6	2	
Total	2.714	2.478	2.060	1.903	1.680	1.688	1.689	1.810	1.830	1.806	-1%	-4%

Figura 24. Tasa de fallecidos por millón de habitantes desagregada por provincias. España, 2018. Fuente: Dirección General de Tráfico, 2018

Finamente, resulta relevante mencionar algunas de las características de la base de datos de referencia en España, el Registro Nacional de Víctimas de Accidentes de Tráfico, regulado por la Orden INT/2223/2014, de 27 de octubre, por la que se regula la comunicación de la información al Registro Nacional de Víctimas de Accidentes de Tráfico, en vigor desde enero de 2015. Esta base de datos, que será detallada más adelante en el capítulo II.4, incluye información referente a los accidentes de tráfico con víctimas, recopilada por los agentes de la autoridad encargados de la vigilancia y el control del tráfico, a excepción de Cataluña y el País Vasco. Algunos de los aspectos a tener en cuenta en esta base de datos son los cambios metodológicos en el cómputo de fallecidos a 30 días que se han dado a lo largo de la serie estadística. Hasta el año 1993, el cómputo de fallecidos a 30 días se realizaba mediante la aplicación del factor corrector recomendado por la Conferencia Europea de Ministros de Transportes (CEMT) sobre la cifra de fallecidos. Sin embargo, desde 1993 hasta 2010, la metodología para el cálculo de los muertos a 30 días cambió, debiendo realizarse a partir de ese año mediante la aplicación de los factores correctores deducidos del seguimiento real de una muestra representativa de heridos graves. Este seguimiento real se lleva a cabo a través de los cuerpos policiales y de la Agrupación de Tráfico de la Guardia Civil. Los factores correctivos se aplicaron por primera vez en el año 1993 y fueron revisados en 1996 y en el año 2000. Posteriormente, en 2011 y 2012, se volvió a modificar la metodología, pasando a realizarse mediante las pautas especificadas en el Anexo metodológico adjunto al Anuario Estadístico de Accidentes de 2012 (DGT, 2012). Este cambio fue impulsado principalmente por las diferencias encontradas en cuando al cómputo de las defunciones entre el sector transporte y las fuentes procedentes de otros sectores. El nuevo método de cómputo se desarrolla en dos fases: por un lado, se crea una unión entre los registros de accidentes de tráfico de la DGT y el Registro de Defunciones del INE. Se verifican uno a uno todos los fallecidos y heridos graves indicados por los agentes con los archivos electrónicos del INE. A continuación, se dividen los heridos graves en dos estratos, un primer estrato formado por aquellos con variables identificativas y otro con heridos de los que se desconocen datos. Estos datos del estrato 1 se cruzan con el registro de defunciones, obteniendo los heridos graves que realmente han fallecido dentro de los 30 días siguientes. Posteriormente, se calcula un factor de corrección en función de los datos de este primer estrato de los que se conoce información, para posteriormente aplicarlo sobre el segundo estrato, obteniendo una estimación de los fallecidos en este segundo grupo, partiendo de la hipótesis de que éstos se han comportado de la misma forma que los heridos graves del primer estrato.

4.2. Evolución de las políticas de seguridad vial en España

La política de seguridad vial en España tiene su origen en 1979, a raíz del Real Decreto 1089/1976, de 23 de abril, por el que se crea la Comisión Nacional de Seguridad Vial, precursor del actual Consejo Superior de Tráfico, Seguridad Vial y Movilidad Sostenible. Ese mismo año se creó un programa nacional de seguridad vial, aprobado por el Consejo de Ministros y que posteriormente, en 1989 se convirtió en un plan de periodicidad anual. Si bien en un principio sólo incorporaba las actuaciones de la Administración Central, poco a poco se fueron incorporando las medidas y programas de las Comunidades Autónomas en materia de seguridad. En 1989, el Plan Nacional de Seguridad Vial supuso la creación de un programa pormenorizado de las actuaciones a realizar por parte de los organismos con competencias en seguridad vial. Esta primera etapa dio paso a un nuevo planteamiento en el que se empezaron a elaborar planes estratégicos acorde a las estrategias europeas que se habían llevado a cabo hasta el momento. La creación en Europa del Libro Blanco y su ambicioso propósito de reducir los fallecidos en un 50% en el año 2010, conducirían a una nueva etapa de planificación estratégica de la seguridad vial en España, que se inició con la creación del Plan de Medidas Especiales para los años 2004-2005. Este plan concretó ocho medidas básicas, destacando entre ellas la implantación del permiso por puntos, la creación del Observatorio Nacional de Seguridad Vial y la instauración de dispositivos tecnológicos de vigilancia, entre muchas otras. Este hito supuso un cambio de tendencia, dando lugar a nuevas políticas de seguridad vial para hacer frente a la demanda social.

Sin embargo, no fue hasta 2003 cuando surgió la gran preocupación, después de que se alcanzase la cifra de 5.399 víctimas mortales en España. Este hecho supuso que la seguridad vial pasase a ser una prioridad nacional, hasta el punto de que se incluyeron medidas en este ámbito como promesas en las campañas políticas durante las elecciones de 2004. Esto dio lugar al Plan Estratégico de Seguridad Vial 2005-2008 y una mayor concienciación ciudadana. Se comienzan a trasponer medidas y prácticas europeas, como por ejemplo el permiso por puntos, obteniendo buenos resultados en cuanto a la reducción de las cifras de siniestralidad. Este plan se apoyó en tres pilares fundamentales: en primer lugar, la Dirección General de Tráfico estableció un conjunto de Medidas Especiales de Seguridad Vial 2004-2005 dirigidas a alcanzar mejoras en los resultados de forma inmediata; en segundo lugar, se propone un paquete de medidas destinadas a tener un impacto duradero en el tiempo, denominado Plan de Acciones Estratégicas Claves 2005-2008; finalmente, con el propósito de abordar la siniestralidad de un tipo concreto de vías, las vías urbanas, se implementa el Plan de Seguridad Vial Urbana Tipo.

En el contexto nacional, siguiendo los pasos de las directrices propuestas por la Unión Europea, actualmente está vigente la “Estrategia de Seguridad Vial 2011-2020”. Esta estrategia incorpora todas las intervenciones de la Administración General del Estado que tienen como objetivo la mejora de las cifras de siniestralidad vial. En concreto se centra en seis prioridades que dan respuesta a los principales focos de siniestralidad determinados (ver Figura 25).

Figura 25. Prioridades de la Estrategia de Seguridad Vial 2011-2020, España. Fuente: DGT, 2011

Además, la estrategia introduce un grupo de indicadores como meta de cumplimiento en el año 2020. Entre ellos destacan los siguientes: reducir la tasa de 37 fallecidos por cada millón de habitantes; disminuir en un 35% el número de heridos graves; lograr que ningún niño fallezca como consecuencia de no tener un sistema de retención infantil; reducir en un 25% el porcentaje de conductores jóvenes (18-24 años) fallecidos y heridos de gravedad durante el fin de semana; 10% menos de conductores fallecidos mayores de 64 años; reducir en un 30% las víctimas mortales por atropello; aumentar en un millón de ciclistas sin que esto implique un incremento en su tasa de mortalidad; alcanzar la cifra de cero fallecidos en turistas en zona urbana; 20% menos de víctimas mortales y heridos graves en usuarios de motocicletas; 30% menos de víctimas mortales como consecuencia de una salida de la vía en carretera convencional; 30% menos de fallecidos en accidentes *in itinere*; reducir en un 1% los positivos de alcoholemia; disminuir un 50% el porcentaje de vehículos ligeros que superan el límite de velocidad en 20km/h. A día de hoy, seis de estos indicadores no han sido alcanzados y precisan de esfuerzos adicionales para su cumplimiento.

Con este propósito se pone en marcha la estrategia española de seguridad vial 2021-2030, aún en preparación, basada en el objetivo de reducir en un 50% el número de fallecidos y heridos graves, siguiendo las líneas en la reducción de la accidentalidad vial que ya se produjo en 2018 y en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas de la Agenda 2030. Además, se está trabajando en un Anteproyecto de Ley de modificación del permiso por puntos para actualizar las infracciones relacionadas con el uso del teléfono móvil al volante y a los cursos de reeducación vial. De igual modo, también se modificará el Reglamento General de Conductores para incluir una mayor formación en clases de concienciación y sensibilización vial y se desarrollará un Real Decreto de medidas urbanas de tráfico para reducir la velocidad en las ciudades. Finalmente, se elaborará un Real Decreto de los servicios de auxilio en vías públicas, todo ello para seguir avanzando en el objetivo común de que se produzca el menor número de accidentes, fallecidos y heridos graves posible.

CAPÍTULO II.2 ENVEJECIMIENTO DE LA POBLACIÓN Y SEGURIDAD VIAL

1. Las principales cifras del envejecimiento poblacional

Otro de los desafíos a los que se enfrentan gran parte de las regiones del mundo, además del aumento de las cifras de siniestralidad vial como hemos visto en el capítulo anterior, es el envejecimiento poblacional. La esperanza de vida de la población está aumentando año tras año y este crecimiento demográfico de personas de edad avanzada está a punto de convertirse en uno de los cambios sociales más importantes del siglo XXI, con consecuencias en la mayoría de los sectores de la sociedad, entre ellos, el transporte y la seguridad vial. El descenso de la fecundidad y el crecimiento de las personas centenarias constituyen un mundo avejentado que deberá revisar todas las infraestructuras sociales con el fin de sostener la economía y asistir a las personas dependientes. En los próximos decenios, numerosos países estarán obligados a revisar sus políticas públicas y programas para cubrir las necesidades de asistencia sanitaria, retribuciones y garantías sociales de este grupo de población en aumento.

A nivel global, el grupo de población de mayores de 65 años aumenta a un ritmo muy superior que el resto de segmentos poblacionales. La esperanza de vida en el mundo ha aumentado cinco años de media desde el año 2000, el aumento más rápido desde la década de los 60. En 2017 había aproximadamente 962 millones de personas en el mundo mayores de 60 años, casi más del doble que en 1980, cuando la población mundial de ancianos era de 382 millones. Se espera que esta cifra se duplique nuevamente para 2050, cuando se proyecta que alcanzará casi 2,1 billones (Naciones Unidas, 2017). En el año 2050, una de cada seis personas en el mundo será mayor de 65 años, llegando a alcanzar la cifra del 16% del total, un valor muy superior a la proporción actual de una de cada once en 2019 (9%). Este problema se acentuará en algunas regiones, como en Europa y América del Norte, donde se estima que alcance el valor

de una de cada cuatro personas en 2050. Además, a nivel global, en 2018 por primera vez en la historia demográfica, el número de personas mayores de 65 años superó al grupo de edad de menores de cinco años. El cambio poblacional se puede observar en las pirámides poblacionales de los años 1990 y 2020, la cual ha pasado a tener una forma triangular a tener una forma de campana (ver Figura 26 y Figura 27).

Figura 26. Pirámide de la población mundial en 1990 en función del sexo. Fuente: Naciones Unidas, 2019

Figura 27. Pirámide de la población mundial en 2020 en función del sexo. Fuente: Naciones Unidas, 2019

En la Unión Europea, la situación es muy similar al contexto internacional. Los europeos viven más que nunca y el perfil de edad de la sociedad está evolucionando rápidamente. Este envejecimiento de la población ha estado impulsado por las tasas de fertilidad históricamente bajas, el aumento de la esperanza de vida y, en algunos casos, patrones migratorios. El 1 de enero de 2016, la población de Europa era de aproximadamente 510,3 millones, de los cuales el 10,2% tenía 65 años o más, un aumento del 2,4% en comparación con diez años antes

(EUROSTAT, 2018). El grupo de 65 años o más está aumentando más rápido que cualquier otro en esta región y se espera que continúe siendo el segmento de población de más rápido crecimiento durante al menos los próximos 50 años, a una cifra del 30% en 2050 (EUROSTAT, 2018). Este es el mayor desafío para los países miembro en los próximos años, particularmente porque no ha recibido suficiente atención científica hasta ahora. Tal y como se puede observar en la Figura 28, el grupo de edad comprendido entre 75 y 84 años se expandirá en un 60,5% en el periodo 2018-2050, mientras que el grupo de edad 65 a 74 años se prevé que aumente en un 17,6%. Sin embargo, el aspecto más destacable en cuanto a la estructura poblacional se refiere es que el grupo de edad de más de 85 años está creciendo a un ritmo más rápido que cualquier otro grupo de edad. Este grupo en concreto se duplicará en este periodo, alcanzando el valor del 130,3%. Para dar una idea de la magnitud de este cambio, este grupo aumentará de los 13,8 millones en 2018 a 31,8 millones en 2050.

Figura 28. Proyección del tamaño de población en la Unión Europea en función de los diferentes grupos de edad. Valores expresados en millones de habitantes. Europa, 2001-2050. Fuente: EUROSTAT, 2019

En el caso español, el fenómeno del envejecimiento se observa especialmente acelerado, siendo uno de los países con peores cifras de la Unión Europea. En menos de 30 años, el número de personas mayores de 65 años se ha duplicado. Los datos actuales en España muestran que la población de edad avanzada (mayores de 65 años) representa alrededor del 19,4% de la población total, con más de nueve millones de personas (INE, 2019), de las que prácticamente un 25% son octogenarias. En este sentido y según las proyecciones del Instituto Nacional de Estadística, en el año 2050 este grupo de edad alcanzará el 30% de la población (con casi 14 millones). Estas estimaciones son aún más desesperanzadoras si tenemos en cuenta los estudios internacionales de prospectiva realizados al respecto, y en las proyecciones llevadas a cabo por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que posicionan a España como el país más envejecido del mundo en el año 2050.

Como veremos en el siguiente epígrafe, estas cifras son preocupantes y nos invitan a reflexionar sobre la influencia del envejecimiento de la población en los diferentes sectores de la sociedad y particularmente, en el sector del transporte, ya que un incremento poblacional va a tener una repercusión indiscutible en la seguridad vial, debido al aumento del número de usuarios de edad avanzada en la carretera, con el consecuente aumento de las cifras de siniestralidad vial, dada la vulnerabilidad de este grupo concreto.

2. El envejecimiento poblacional y la seguridad vial

En términos de seguridad vial, el rápido crecimiento de los ancianos entre la población total también vuelve a ganar especial importancia, ya que junto con este incremento se producirá también un aumento incuestionable del porcentaje de usuarios de la carretera (conductores, peatones y ciclistas) de edad avanzada y del número de permisos de conducir en este segmento de la población. Esta tendencia es motivo de gran preocupación ya que los conductores mayores de 65 años experimentan más fallecimientos anuales por kilómetro conducido que cualquier otro grupo de edad (Polders et al., 2015). Además, los peatones mayores se encuentran entre los usuarios de la carretera más vulnerables en el sistema de transporte. Los accidentes que involucran a usuarios ancianos se elevarán a niveles alarmantes si no se toman medidas a nivel nacional para mejorar la seguridad. En la actualidad, más de 3,5 millones de personas mayores de 65 años mantienen el permiso de conducir en España. Esta cifra supone más del 13,5% del censo de conductores y aumenta año tras año. Para hacernos una idea de este incremento, en el periodo comprendido entre 2009 y 2018, el número de conductores se incrementó un 26,5% (DGT, 2018). Además, en el año 2010, por primera vez, el grupo de edad de personas mayores de 65 años pasó a ser el tramo de edad con más víctimas mortales por accidente de tráfico en España, un dato que nos invita a reflexionar sobre la influencia del envejecimiento de la población en la siniestralidad vial. A día de hoy, en España cada año se producen en torno a 500 víctimas mortales entre los mayores de 65 años como consecuencia de un accidente de tráfico.

Figura 29. Comparación del censo de conductores por cada 1.000 habitantes entre los años 2009 y 2018 en España, en función de los grupos de edad. Fuente: Dirección General de Tráfico, 2018

Con respecto al riesgo de accidente, a pesar de que en términos absolutos los conductores ancianos sufren menos accidentes que otros grupos de edad (Langford y Koppel, 2006), la realidad es que si se tiene en cuenta la menor frecuencia de conducción de los ancianos, como pueden ser los kilómetros recorridos o el número de permisos de conducir vigentes, se observa un incremento de la accidentalidad en los mayores de 60 años (Evans, 2004; Mauleners, Harding y Legge, 2006). Sin embargo, el número de permisos de conducción vigentes podría no ser un indicador fiable, ya que habrá muchos mayores de 65 años que tendrán permiso de conducir pero no hagan uso del mismo. Por este motivo, Vargas et al. (2006) ideó un indicador basado en el número de litros de combustible repostado. Los resultados de esta investigación revelaron que el riesgo de sufrir un accidente con heridos para los conductores ancianos es mayor que el grupo de conductores de 40 años de edad y menor que el grupo de jóvenes de 20 años. Sin embargo, estas medidas podrían tener un sesgo, tal y como afirma Hakamies-Blomqvist et al. (2002). Este grupo de investigadores revelaron que los conductores que recorren más kilómetros tienen una

menor tasa de accidentalidad por kilómetro, si los comparamos con aquellos conductores que conducen menos, debido fundamentalmente a que los conductores de edad avanzada habitualmente recorren distancias más pequeñas y están implicados en mayor medida en accidentes por unidad de distancia, comparando con aquellos que realizan mayores trayectos.

3. Efectos funcionales de la edad en la conducción

A medida que envejecemos, se producen cambios en la salud que pueden afectar y deteriorar nuestra capacidad de conducir. Entre las deficiencias que pueden presentar los usuarios de la vía mayores de 65 años, es importante distinguir entre el deterioro general vinculado con la edad y el proceso de envejecimiento, y los déficits causados por la aparición de enfermedades y el envejecimiento patológico. Los usuarios de edad avanzada pueden presentar déficits en las áreas cognitivas, sensoriales o motoras, sobre todo en la percepción y en la atención (Langford et al., 2006; D'Ambrosio et al., 2008; Okonkwo et al., 2008). Estas alteraciones pueden derivar en una reducción de las capacidades de conducción, aumentando notablemente las dificultades que puedan encontrar en la conducción. Además, este grupo de edad avanzada muchas veces tiene dificultades para juzgar la velocidad y las intenciones de otros usuarios de la carretera (Gonawala, Badami, Electicwala y Kumar, 2013).

Con respecto a las alteraciones sensoriales, es incuestionable que gran parte de la información que recibe un conductor cuando está al volante proviene de la visión, por lo que cualquier patología que obstaculice una correcta visión derivará en inseguridad al volante. A medida que envejecemos, nuestro sistema visual se va deteriorando, dando lugar a una decadencia de los movimientos oculares, así como mayores dificultades para habituarnos a la oscuridad, pérdida de la agudeza visual o reducción del campo de visión, entre muchos otros factores. Otra de las patologías sensoriales que surge con la edad es la pérdida de audición, que puede interferir también en la conducción, haciendo que no detectemos determinadas señales acústicas que nos avisan de un peligro. Por otro lado, con el avance de la edad también pueden aparecer déficits cognitivos, como puede ser tener que destinar un tiempo mayor para procesar la información o la disminución de los reflejos de respuesta ante imprevistos (Díaz y Izal-Fernández, 2005; Horswill et al., 2008). Otro aspecto a tener en cuenta es que a medida que envejecemos, nuestras articulaciones y nuestros músculos se debilitan, con la consecuente disminución de la capacidad motora y articular. Esto puede repercutir directamente en la conducción, ya que da lugar a una menor agilidad motriz y un aumento del tiempo de reacción ante una importante decisión. Igualmente, esta alteración influye también sobre la limitación de los movimientos de giro de cabeza y cuello, aspectos que se consideran muy importantes cuando el conductor se encuentra con una intersección o tiene que realizar una maniobra que le obligue a observar mediante los espejos retrovisores. No obstante, Marmeleiraa et al. (2009) demostró que si este grupo de edad, formado por mayores de 65 años, ponen en práctica un programa de entrenamiento físico y cognitivo se pueden lograr un conjunto de mejoras en lo que respecta al tiempo de respuesta, a la reacción del conductor y a la atención visual, aspectos que se consideran fundamentales para una conducción segura.

Por otro lado, en este grupo de edad no sólo son importantes las enfermedades, sino también los efectos secundarios que pueden provocar algunos medicamentos y que pueden tener un efecto perjudicial en la conducción. Es evidente que el uso de medicación aumenta con el paso de los años y su consumo es muy común en las personas de edad avanzada. Los autores de un estudio realizado en España (Garre-Olmo et al., 2009) descubrieron que un 45,8% de los conductores mayores de 74 años consumía medicamentos que afectaban al sistema nervioso central, resultando ser casi un tercio de ellos medicamentos ansiolíticos. Este descubrimiento

resulta relevante, pues Herbert, et al. (2007) detectó una relación entre el consumo de benzodiacepinas y el incremento del riesgo de accidentes.

Finalmente, se considera imprescindible destacar que a pesar de que la probabilidad de que los usuarios de avanzada edad se vean involucrados en un accidente es menor que en la de otros grupos de edad, como hemos visto anteriormente, en el que caso de que sucediese, éstos sufren daños físicos mucho más graves, en comparación con los jóvenes o los usuarios de mediana edad. Los usuarios ancianos tienen una mayor fragilidad que el resto, lo que incrementa el riesgo de sufrir lesiones graves o incluso el fallecimiento tras un accidente.

4. El envejecimiento poblacional, la concentración urbana y la siniestralidad vial

La población anciana tiende a vivir en pueblos pequeños y medianos (Abellán, Ayala y Pujol, 2017). Las áreas rurales también están asociadas con pequeñas poblaciones y una mayor dependencia de la conducción debido a la ausencia y las limitaciones del transporte público urbano. Se han encontrado diferencias notables entre los usuarios que viven en zonas rurales y urbanas (Yuan y Lin, 2013), y los residentes rurales se desplazan aproximadamente un 33% más que los residentes urbanos (Litman, 2017). Algunos autores (Marshall y Ferenchak, 2017) han demostrado que la mayoría de los residentes de las áreas rurales sufren mayores tasas de mortalidad en carretera que aquellos que viven en áreas urbanas. Esta investigación (Marshall y Ferenchak, 2017) también reveló importantes disparidades regionales entre residentes rurales y urbanos en términos de los impactos en la seguridad vial del sistema de transporte. Se ha encontrado un vínculo positivo entre la concentración urbana y el tráfico urbano más seguro (Castro-Nuño y Arévalo-Quijada, 2018), a expensas de las áreas rurales. Estos hallazgos plantean la cuestión de la equidad de los impactos y destacan la necesidad de investigación e inversión en infraestructura en áreas rurales para mejorar la seguridad vial. El término equidad se refiere a la imparcialidad con la que se distribuyen los impactos (Litman, 2015), y aunque el problema de los accidentes de tráfico en ciudades rurales en España puede parecer menor en términos de víctimas mortales, el estudio de las carreteras rurales debe priorizarse sobre el urbano caminos siguiendo un enfoque de equidad social.

En España, como en la mayoría de los países desarrollados, la población de personas mayores tiende a concentrarse en pueblos con menos de 2.000 habitantes, en los que el 28,2% de la población es de avanzada edad (Abellán et al., 2017). Representan sólo el 20% de la población en España, pero sorprendentemente protagonizan alrededor del 71% de las muertes por accidentes de tráfico (DGT, 2016). Las travesías adquieren una particular importancia como un tipo de carretera rural en este escenario. En este tipo concreto de vía, los habitantes de estas ciudades pequeñas están mucho más expuestos a los accidentes de tráfico y han visto cómo el viario principal ha quedado absorbido por un itinerario rural interurbano, provocando conflictos entre las necesidades de movilidad urbana y las mayores demandas de velocidad que exigen los tráfico interurbanos. Los itinerarios peatonales se ven afectados como consecuencia de la carretera que atraviesa la población, deteriorando la vida cotidiana de sus habitantes. En estos casos, los peatones son el grupo de usuarios más vulnerable debido a su falta de protección y su tolerancia limitada a las colisiones de vehículos.

Este tipo particular de carretera, de ámbito mayormente rural, ha registrado en los últimos años en España tasas de accidentes muy altas, alcanzando el 2% de todas las muertes y lesiones graves de tráfico. (DGT, 2016). La tasa de letalidad (definida como el número de fallecidos por cada 100 víctimas) alcanzó en 2016 la cifra de 2.3, mientras que en vías urbanas fue de 0.6. En 2016 en estas carreteras se produjeron 1.465 accidentes, en las que murieron 47 personas, 149 resultaron gravemente heridas y 1.805 sufrieron heridas leves (DGT, 2016). Estas cifras representan un incremento en comparación con 2015, y aún están lejos de las cifras de 2011 y

2012 (523 accidentes; 37 muertes; 113 heridos graves). Por este motivo resulta importante aclarar los factores que incrementan la probabilidad de que se produzca un desenlace mortal cuando ocurre un accidente en este tipo de carretera, con el objetivo de reducir la gravedad del accidente y extrapolar esta experiencia a otros países desarrollados. Específicamente en términos de envejecimiento de la población, muchos de los accidentes registrados en las carreteras de la ciudad española involucraron al menos a un peatón (en más de un 30% del total de accidentes), y una gran parte de estos peatones eran ancianos (42% de los accidentes con heridos graves y 71 % de accidentes con fallecidos).

Estas cifras muestran la importancia del envejecimiento de los peatones en este tipo de carretera rural, y nos han llevado a realizar un análisis empírico detallado de todas las colisiones entre peatones y vehículos con víctimas de edad avanzada (mayores de 65 años) en travesías de España entre 2006 y 2015. Si bien existe una extensa literatura sobre la disminución de las habilidades de conducción y peatones en los ancianos, pocos estudios se centran en los factores alternativos que contribuyen a la mayor gravedad de los accidentes que involucran a peatones o conductores mayores. Existen muchas variables concurrentes que afectan la gravedad de un accidente de tráfico (indicadores de infraestructura vial, variables de tráfico y exposición y variables socioeconómicas), pero hasta ahora la literatura se ha concentrado en infraestructura, infracciones y variables de exposición al riesgo, pasando por alto algunos indicadores territoriales.

CAPÍTULO II.3 LAS TRAVESÍAS ESPAÑOLAS

1. El concepto de travesía

La necesidad de poder distinguir la función que desempeñan las travesías dentro de la red de carreteras ha dado lugar, por parte de los cuerpos legislativos, a la creación de diferentes definiciones del concepto de travesía (DGT, 2019). A continuación, en el presente apartado se analizarán las diferentes definiciones existentes, desde el punto de vista estatal y autonómico, resaltando principalmente las discrepancias existentes entre ellas y su dificultad de interpretación.

Por un lado, el Real Decreto Legislativo 6/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, en su anexo I, apartado 71, define la travesía como *“aquel tramo de carretera que discurre por poblado. No tendrán la consideración de travesías aquellos tramos que dispongan de una alternativa viaria o variante a la cual tiene acceso”*. Por tanto, tal y como expresa la definición anterior, la legislación de seguridad vial entiende la travesía a partir del concepto de poblado, al igual que sucede con muchas otras definiciones, como pueden ser las de carretera, vía urbana o vía interurbana. Esta misma legislación, en su apartado 70 del anexo I, define el concepto de poblado como *“aquel espacio que comprende edificios y en cuyas vías de entrada y de salida están colocadas, respectivamente, las señales de entrada a poblado y de salida de poblado”*. Esta definición se puede interpretar de muchas formas, pudiendo derivar en criterios muy variados por parte de las diferentes administraciones y autoridades competentes. Por tanto, tal y como recoge esta legislación, las vías se pueden clasificar en tres categorías, vías interurbanas (fuera de poblado), vías urbanas y travesías (en poblado), en función de la existencia de edificación en los márgenes de la vía, así como la existencia de señalización de entrada y salida del poblado.

Por otro lado, en el ámbito de legislación estatal, la Ley 37/2015, de 29 de septiembre, de carreteras, en su capítulo IV sobre travesías y tramos urbanos, define la travesía como *“la parte de carretera en la que existen edificaciones consolidadas al menos en dos terceras partes de la longitud de ambas márgenes y un entramado de calles conectadas con aquella en al menos una de sus márgenes”*. Además, esta legislación, en un intento de definir con mayor precisión y claridad el concepto de travesías a los efectos de catalogar y gestionar dichas vías, en el

preámbulo de dicha ley establece un nuevo enfoque para proceder a la calificación de un tramo de carretera como urbano. Se considerará un tramo urbano cuando exista un estudio de delimitación que haya sido aprobado previamente por el Ministerio de Fomento, tratando de eliminar la clasificación urbanística como punto de partida que tantas dificultades plantea.

Asimismo, esta ley, en su artículo 47 define tramo urbano como *“aquellos de las carreteras del Estado que discurran por suelo clasificado como urbano por el correspondiente instrumento de planeamiento urbanístico y que estén reconocidos como tales en un estudio de delimitación de tramos urbanos aprobado por el Ministerio de Fomento, mediante expediente tramitado por su propia iniciativa o a instancia del ayuntamiento interesado”*. Como se puede observar, esta definición difiere notablemente de la propuesta por la legislación de seguridad vial. Además, siguen existiendo ambigüedades en relación a la delimitación del inicio y el final de una travesía, ya que existirían múltiples opciones de delimitación que cumplirían con la premisa de que existen edificaciones consolidadas en al menos dos terceras partes de su longitud.

Finalmente, cabe destacar que además de la legislación estatal existen también numerosas carreteras de competencia autonómica, con su correspondiente legislación por comunidades, en la que se aprecian también discrepancias entre los conceptos de tramo urbano y travesía, con la consecuente complejidad y dificultad de interpretación. La gran mayoría de las leyes autonómicas consideran un tramo urbano como aquel tramo de carretera que discurre por suelo clasificado como urbano por el correspondiente órgano de ordenación territorial, si bien muchas de ellas complementan esta definición de muy distintas maneras. Con respecto al concepto de travesía, también existen discrepancias entre las diferentes comunidades autónomas. Por ejemplo, las comunidades de Andalucía, Aragón, Cataluña y Madrid, al igual que la legislación de carreteras estatal, definen la travesía como aquel tramo de la vía en el que existan edificaciones consolidadas en al menos dos terceras partes del total, así como un entramado de calles en uno de sus márgenes. Sin embargo, en otras comunidades, como puede ser Galicia, establecen la clasificación de travesía en función del contexto urbano o rural en el que se encuentre su trazado. A todas estas complejidades hay que añadir que en muchas ocasiones una misma travesía puede estar formada por distintos tramos correspondientes a diferentes administraciones (ver Figura 30), resaltando aún más las discrepancias y la complejidad en cuanto a términos de definiciones se refiere.

Figura 30. Convergencia de vías de distinta titularidad en el núcleo urbano de El Ejido (Almería). Fuente: Documento Estrategia-T, Dirección General de Tráfico, 2019

2. La problemática de las travesías

Las carreteras generan numerosos efectos negativos y externalidades. Uno de ellos, ignorado a menudo por los gestores de las infraestructuras es el “efecto barrera”, que se refiere al efecto que una infraestructura de transporte lineal o de tráfico motorizado genera al constituir una barrera física y psicológica que separa una comunidad o población en dos partes. Este asunto ha adquirido gran importancia social y política en las últimas décadas debido a la creciente preocupación por la vulnerabilidad de algunos grupos de población como ancianos y peatones, así como a la atención cada vez mayor que se les presta a las relaciones entre la accesibilidad, la movilidad peatonal, la desigualdad de ingresos y segregación espacial en muchas poblaciones.

En España, una de las carreteras que más sufre este efecto barrera son las travesías de población, tramos de la red de carreteras que atraviesan poblaciones pequeñas, sin alternativa de variante. Como consecuencia, en este tipo de vías la accesibilidad peatonal a los principales centros de actividad (escuelas, centros de salud, bancos, supermercados) se deteriora. Toda infraestructura de transporte lineal con niveles de tráfico elevado y altas velocidades implica una barrera física para peatones y ciclistas, que separa la población en dos áreas urbanizadas diferenciadas (ver Figura 31). La conectividad peatonal depende de un gran número de factores, como el trazado de las calles, la continuidad de las aceras pavimentadas y principalmente la armonía entre el espacio asignado al tráfico motorizado y el no motorizado (Hess, 1997). El efecto barrera será más importante en función de la posición que la travesía tenga en la ciudad y el volumen de tráfico que soporte (Millán, 1990).

Figura 31. Efecto barrera que produce la travesía a su paso por una población. Interferencia de la travesía con los itinerarios peatonales de los residentes. Fuente: elaboración propia con la herramienta My Maps de Google

Además, a este conflicto potencial hay que añadirle muchos otros, resultantes de las diferencias existentes entre las necesidades de los usuarios que comparten territorio. Por ejemplo, si analizamos la problemática desde el punto de vista del tráfico interurbano, las actuaciones demandadas por este colectivo irán orientadas a conseguir una circulación rápida, segura y confortable, buscando el ahorro de tiempo y la continuidad del itinerario que aportan las variantes. Sin embargo, si lo examinamos desde la perspectiva de los residentes, la coexistencia con el tráfico de paso supone agresiones ambientales y un incremento de peligrosidad, que

generalmente viene acompañado de una transformación de la trama urbana cuando, por ejemplo, se eliminan las aceras para ganarle sección de la calzada (ver Figura 34).

Figura 32. Travesía de Cangas, en Pontevedra, Galicia. Fuente: DGT, 2019

Por tanto, todos estos conflictos han hecho que la política de carreteras haya recurrido a la construcción de variantes, como medida alternativa a los puntos de discontinuidad que representan las travesías en el itinerario interurbano. Sin embargo, esta disyuntiva puede tener numerosos efectos en la población y es un tema muy complejo que debe abordarse desde muchas perspectivas. Por un lado, la construcción de variantes tiene una repercusión económica considerable, no sólo por el coste de su construcción, sino porque en algunas poblaciones el desvío de la carretera puede repercutir en la economía local, anulando determinados beneficios que la antigua carretera ofrecía a los comercios. Puede haber poblaciones en las que el mercado no reside en la ciudad, sino en la población transeúnte. Por otro lado, la ejecución de una variante también puede suponer un impacto en la trama urbana de la ciudad en lo que respecta al modelo de crecimiento de la misma. Cuando eliminamos la función de una travesía y la sustituimos por una variante, ésta debe ser rediseñada para reintegrarla en la malla urbana, revisando su geometría y los usos de sus márgenes. Además, la construcción de una nueva carretera puede dar lugar al desplazamiento de centros de actividad y puntos de interés para acercarlos a su nuevo trazado, provocando que la población comience a crecer en esa dirección y atrayendo nuevos usos que en un medio-largo plazo puede terminar incorporando de nuevo la carretera en la trama urbana, volviendo al punto de partida inicial. Por este motivo, la única manera de conocer con certeza la conveniencia de conservar o suprimir las travesías es analizar cada una de ellas de forma particular, teniendo en cuenta un conjunto de factores. Para ello es necesario tener un conocimiento detallado de las mismas, no sólo desde la perspectiva de las características del diseño y su funcionalidad viaria, sino también desde el punto de vista de las ciudades en las que intersecan y es ahí donde los factores territoriales tienen especial relevancia.

3. Caracterización de la accidentalidad en travesías

Las travesías de poblaciones relativamente pequeñas que han crecido a lo largo de la carretera presentan una problemática diferenciada. En ellas el problema de la accidentalidad se ve acrecentado por la existencia de numerosas intersecciones y accesos, y de muchos usuarios vulnerables (peatones, ciclistas, niños, ancianos), cuyo atropello, para que no sea mortal, exigen una velocidad muy reducida. A pesar de que la velocidad en una travesía está limitada a 50km/h y que ésta se anuncia en la señalización del principio y el fin del casco urbano, muy frecuentemente los usuarios de las mismas superan este límite establecido, representando un problema de peligrosidad para los residentes. Además, a día de hoy muchas travesías siguen

teniendo un aspecto de carretera interurbana, con carriles y arcenes muy amplios, cunetas en vez de caces, que hacen que el conductor no perciba que está atravesando un núcleo urbano y siga creyendo que se encuentra en su itinerario interurbano.

Es por todo ello por lo que las travesías son una de las vías con mayor tasa de accidentes en España, alcanzando el 2% de todas las muertes y lesiones graves de tráfico. En 2018, en las travesías españolas se produjeron 1.595 accidentes con víctimas, en los que fallecieron 43 personas, 168 resultaron heridos graves y requirieron hospitalización y 1.882 resultaron heridos leves y no requirieron hospitalización. Con respecto a la localización geográfica de los accidentes en travesías, las comunidades autónomas con mayor siniestralidad en el periodo 2006-2015 han sido Cataluña y Galicia. Los accidentes se concentran principalmente en la zona costera de estas comunidades (ver Figura 33).

Figura 33. Mapa de accidentalidad de las travesías con heridos graves y fallecidos en el periodo 2006-2015. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del registro de accidentes de la DGT

Teniendo en cuenta únicamente accidentes con heridos graves, en el mapa de accidentalidad se pueden diferenciar claramente dos corredores afectados: el corredor noroeste, con origen en Madrid y destino Galicia, y el corredor norte, que va desde Logroño hasta León, pasando por Burgos (ver Figura 33). Asimismo, el corredor mediterráneo también ha sido uno de los ejes con mayor número de tramos de concentración de accidentes, abarcando todo el litoral desde Figueras hasta Peñíscola. Además, determinadas provincias pertenecientes al levante español se han visto afectadas de forma aislada, como Valencia, Alicante o Murcia. Finalmente, la comunidad autónoma de Cantabria presenta un elevado número de accidentes, así como el eje Zaragoza-Santander. Sin embargo, si analizamos únicamente los accidentes con fallecidos en el periodo 2006-2015, estos ejes desaparecen y los accidentes se concentran mayormente en las comunidades autónomas de Cataluña, Galicia, Extremadura y Cantabria, así como en la provincia de León, tal y como se puede observar en la Figura 33.

Con respecto al tamaño poblacional, la base de datos que hemos empleado en este estudio se compone por accidentes que han tenido lugar principalmente en poblaciones pequeñas, de menos de 5.000 habitantes (46,4% en accidentes con heridos graves y 52,5% en accidentes con fallecidos). Asimismo, el 70% de la muestra está formada por poblaciones de menos de 10.000 habitantes (ver Figura 34).

Figura 34. Tamaño de las poblaciones españolas donde han tenido lugar accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido, 2006-2015. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de la DGT

En relación al envejecimiento poblacional, la mayor parte de los accidentes con fallecidos y heridos graves en travesías españolas (un 85% del total) se compone de accidentes que han tenido lugar en poblaciones con un porcentaje de mayores de 65 años comprendido entre el 10 y el 30%, tal y como se puede observar en la Figura 35.

Figura 35. Porcentaje de población mayor de 65 años del conjunto de poblaciones con accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido, 2006-2015. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de la DGT

Con respecto a la tasa de desempleo, la mayoría de las poblaciones donde han tenido lugar los accidentes con heridos graves y fallecidos oscilan entre el 5 y el 20% (el 75% de la muestra se concentra en este rango), tal y como se observa en la Figura 36.

Figura 36. Tasa de desempleo de las poblaciones donde han tenido lugar accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido, 2006-2015. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de la DGT

Con respecto al ingreso per cápita, la mayoría de los accidentes con heridos graves y fallecidos se han producido en poblaciones con una renta per cápita entre 16.000 y 28.000 euros. La media de la muestra se sitúa en valores similares a la media nacional (23.970 euros en 2016).

Figura 37. Renta per cápita de las poblaciones donde han tenido lugar accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido, 2006-2015. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de la DGT

Con respecto al tipo de víctima implicada, casi la mitad de las mismas han sido conductores de vehículos (ver Figura 38). Muchos de estos conductores son jóvenes menores de 30 años (aproximadamente un tercio). El segundo grupo más afectado han sido los pasajeros (19,8% accidentes con heridos graves; 18,1% accidentes con fallecidos).

Figura 38. Porcentajes de los tipos de víctimas implicadas en accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido. Periodo 2006-2015. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del registro de accidentes de la DGT

Con respecto a la edad de los conductores implicados, un tercio de los mismos pertenecen al grupo de jóvenes (menores de 30 años). Como se puede observar en la Figura 39, el segundo grupo más numeroso, también con otro tercio del total de los conductores, fue el grupo de edad comprendido entre 30 y 45 años (31,9% en el primer grupo; 34,8% en el segundo grupo).

Figura 39. Edad de los conductores implicados en accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido. Periodo 2006-2015. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del registro de accidentes de la DGT

Sin embargo, en lo que respecta a los peatones implicados, tal y como se puede observar en la Figura 40, el grupo de edad que más se ha visto afectado es el de edad avanzada (mayores de 65 años). Un 42,4% del total de víctimas que se han visto implicadas en un accidente con al menos un herido grave han sido personas mayores de 65 años. Este porcentaje se eleva considerablemente cuando tenemos en cuenta accidentes con fallecidos, alcanzando un 71,2% del total de víctimas. Estas cifras son muy elevadas y ponen de manifiesto la extrema fragilidad de las personas mayores, dada su mayor comorbilidad, sobre todo cuando se trata de peatones. Por otro lado, el segundo grupo más afectado en el caso de los heridos graves han sido los jóvenes menores de 30 años, mientras que en el caso de los accidentes con fallecidos ha sido el grupo con edad comprendida entre 55 y 65 años.

Figura 40. Edad de los peatones implicados en accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido. Periodo 2006-2015. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del registro de accidentes de la DGT

Finalmente, en relación al sexo de las víctimas, si tenemos en cuenta los conductores implicados en accidentes con heridos graves y fallecidos, la mayor parte de ellos han sido hombres (83% del total de conductores, frente al 17% de mujeres), tal y como se puede observar en la Figura 41. En cambio, este porcentaje se ve reducido si tenemos en cuenta el total de víctimas (no sólo los conductores), donde el porcentaje de mujeres se eleva al 30%, frente al 70% de hombres. En lo que respecta a los peatones, más de la mitad de las víctimas son mujeres (55% del total de peatones).

Figura 41. Sexo de las víctimas implicadas en accidentes en travesías con al menos un herido grave o fallecido. Periodo 2006-2015. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del registro de accidentes de la DGT

CAPÍTULO II.4 FUENTES DE INFORMACIÓN DISPONIBLES

1. Base de datos empleada: Registro Nacional de Accidentes de Tráfico

La base de datos empleada para realizar la presente investigación es el Registro Nacional de Víctimas de Accidentes de Tráfico de la Dirección General de Tráfico (DGT). Está basada en la información recogida en los cuestionarios estadísticos de accidentes que son cumplimentados por los agentes encargados de la vigilancia y control del tráfico. Actualmente, en España existen dos modelos de cuestionarios estadísticos de accidentes: uno para la recogida de datos de accidentes con víctimas y otro para la recogida de información relativa a los accidentes con sólo daños materiales. Ambos figuran como anexos a la Orden INT/2223/2014, de 27 de octubre, por la que se regula la comunicación de la información al Registro Nacional de Víctimas de Accidentes de Tráfico (BOE núm. 289, de 29 de noviembre de 2014). No obstante, en la presente investigación nos centraremos únicamente en el registro de accidentes con víctimas.

Antes de proceder a realizar un análisis descriptivo de este registro, que ha sido utilizado como base de datos para los análisis realizados en la presente tesis doctoral, se ha considerado de interés hacer referencia a algunas de las definiciones y criterios proporcionadas por esta Orden INT/2223/2014 (BOE Nº289, 2014), para la cumplimentación de los formularios de accidentes.

- 1) Accidente de tráfico con víctimas. Deben reunir las circunstancias siguientes:
 - a) Producirse, o tener su origen, en una de las vías o terrenos objeto de la legislación sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial.
 - b) Resultar a consecuencia de los mismos personas fallecidas o heridas.
 - c) Estar implicado, al menos, un vehículo en movimiento.

Las colisiones múltiples entre más de dos vehículos se considerarán como un único accidente, si son sucesivas. Se excluirán:

- a) Los accidentes provocados por muertes naturales confirmadas o en los que existan indicios de suicidio o intento de suicidio, excepto cuando produzcan daños a otras personas.
 - b) Los homicidios, lesiones intencionadas a terceros y/o daños a propiedades.
- 2) Vehículo implicado en un accidente de tráfico. Se considera que un vehículo está implicado en un accidente de tráfico cuando concurren una o varias de las circunstancias siguientes:
 - a) Entrar el vehículo en colisión con: Otro u otros vehículos, en movimiento, parados o estacionados; Peatones; Animales; Otro obstáculo.
 - b) Sin haber entrado en colisión, haber resultado, como consecuencia del accidente, fallecidos o heridos el conductor y/o algún pasajero del vehículo, o haberse ocasionado sólo daños materiales.
 - c) Estar el vehículo parado o estacionado en forma peligrosa, de modo que constituya uno de los factores del accidente.
 - d) Sin haber sufrido el vehículo o sus ocupantes directamente las consecuencias del accidente, constituir el comportamiento del conductor o de alguno de los pasajeros uno de los factores del accidente.
 - e) Haber sido arrollado el conductor o un pasajero del vehículo por otro en el momento en que subía o descendía de él, o después de haber caído desde el vehículo a la vía, en cuyo caso ambos vehículos se consideran implicados.
- 3) Persona implicada en un accidente de tráfico. Se consideran personas implicadas en un accidente de tráfico los ocupantes de los vehículos definidos en el punto anterior y también los peatones cuando resulten afectados por un accidente de tráfico o su comportamiento haya sido uno de los factores del mismo, conforme a lo siguiente:

- a) Conductor. Toda persona que, en el momento del accidente, lleva la dirección de un vehículo implicado en un accidente de tráfico. En vehículos que circulen en función de aprendizaje de la conducción, es conductor la persona que está a cargo de los mandos adicionales.
- b) Pasajero. Toda persona que, sin ser conductor, se encuentra dentro o sobre un vehículo, o es arrollada mientras está subiendo o bajando del vehículo. Los conductores que han dejado de llevar la dirección del vehículo y son arrollados mientras suben o bajan del mismo se consideran pasajeros.
- c) Peatón. Toda persona que, sin ser conductor ni pasajero, se ve implicada en un accidente de tráfico. Se consideran peatones quienes empujan o arrastran un coche de niño o de una persona con movilidad reducida o cualquier otro vehículo sin motor de pequeñas dimensiones, los que conducen a pie un ciclo, ciclomotor o motocicleta; las personas que se desplazan en silla de ruedas, con o sin motor; las personas que se desplazan sobre patines; las personas que se encuentran reparando el vehículo, empujándolo o realizando otra operación fuera del mismo; los conductores o pasajeros que, tras haber abandonado sus vehículos, son arrollados mientras se alejan de los mismos caminando. También se consideran peatones, a los solos efectos de la cumplimentación de los formularios de accidentes, y sin perjuicio de las definiciones establecidas con carácter general en el anexo I del texto articulado de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, las personas que se desplazan sobre un animal de monta y las personas que guían un animal o animales.

Con respecto al registro de accidentes, el formulario con el que se recopilan los datos está estructurado en siete bloques: datos generales, datos de vehículos, datos de los conductores, pasajeros y peatones implicados en el accidente y un sexto bloque en el que se recoge la descripción del accidente, observaciones al accidente, el croquis, los factores concurrentes en opinión del agente y, en el caso de que el accidente sea grave o normal, la secuenciación de los eventos ocurridos en el accidente. A continuación, se mencionan los datos más relevantes que contiene cada uno de los bloques:

Datos generales del accidente

- Datos de localización cronológica (fecha y hora del accidente)
- Datos de localización geográfica (provincia, isla, municipio, población)
- Número total de víctimas, de fallecidos 24 horas, de heridos con ingreso >24 horas, de heridos con asistencia sanitaria ≤ 24 horas, de ilesos, de vehículos, de conductores, de pasajeros y de peatones implicados en el accidente.
- Datos de la vía: zona en que se produjo el accidente, nombre de la vía, titular de la red, punto kilométrico, sentido de circulación, tipo de vía, número de calzadas, número de carriles, barreras de seguridad, elementos de balizamiento, trazado en planta y en alzado, límite de velocidad, alineamiento de la carretera, intensidad circulatoria, existencia de señalización tanto horizontal como vertical.
- Datos relacionados con las condiciones meteorológicas, estado de la superficie de la calzada, luminosidad y nivel de circulación en el momento del accidente.
- Tipo de accidente: Se indica si el accidente fue una salida de la vía o no, si hubo o no colisión y en caso afirmativo se especifica la clase de colisión.

Vehículos implicados

- Datos del registro de vehículos a partir de la matrícula: marca, modelo, fecha de primera matriculación y tipo de vehículo.
- Si el vehículo circulaba con el seguro y la ITV al día.

- Anomalías previas del vehículo.
- Nº de ocupantes por vehículo.
- Si se trata de un vehículo de transporte de mercancías peligrosas
- Si el conductor se dio a la fuga o no.
- Si el vehículo resultó incendiado o no.
- Maniobra del vehículo previa al accidente.
- Lugar de la vía por el que circulaba el vehículo.

Personas implicadas

- Identificación del vehículo en el que viajaba.
- Nombre, apellidos y documento oficial de identificación.
- Nacionalidad.
- Población de residencia o país de residencia (si es extranjero).
- Fecha de nacimiento y sexo
- Lesividad: fallecido, ingreso >24h, ingreso <24h, diferentes tipos de atención sanitaria que no suponen ingreso, sin asistencia sanitaria y se desconoce.
- No computable por: Esta casilla del cuestionario ofrece un catálogo de situaciones que excluyen el cómputo de esa persona como implicada en el accidente. Son los casos de muerte natural, suicidio, intento de suicidio, homicidio e intento de homicidio.
- Uso de accesorios de seguridad (cinturón de seguridad, sistema de retención infantil y casco, protección de brazos, piernas, etc. y las prendas reflectantes).
- Permiso de conducción: clase, año de expedición y otras características (si el permiso era inapropiado para el vehículo que llevaba, si estaba caducado, etc...)
- Motivo del desplazamiento en el caso de los conductores y de los peatones.
- Si se realizaron o no pruebas de alcohol y/o drogas y los resultados de las mismas, en el caso de los conductores y los peatones.
- Presuntas infracciones en el caso de los conductores y de los peatones.
- La opinión del agente respecto de la posible responsabilidad en el accidente
- Los presuntos errores que hayan podido cometer los conductores y/o los peatones
- Posición que ocupaban los pasajeros en los vehículos.
- En el caso de los peatones se especifica la acción que estaba realizando previa a la ocurrencia del accidente.

El cuestionario se completa con un croquis, que consistirá en un dibujo sencillo pero que contenga los elementos suficientes que permitan dar una idea lo más completa posible del lugar y circunstancias del accidente y un espacio para que el agente mediante un breve texto de una descripción de las circunstancias que rodearon al accidente. En el caso de los accidentes graves o mortales se cumplimentará la secuenciación de los eventos ocurridos en el desarrollo del accidente, relacionándose cada evento con la unidad implicada (vehículo o peatón) e informando de la gravedad del evento.

La Dirección General de Tráfico ha ido incorporado sistemas informáticos para automatizar los procesos de recogida, almacenamiento y gestión de los datos. En 2005, con fin de integrar los servicios de información sobre accidentes y los sistemas informáticos, se llevó a cabo un proceso de renovación que permitió unificar todo en un único sistema denominado ARENA (Accidentes: REcogida de iNformación y Análisis). Esta aplicación fue renovada y sustituida por la aplicación ARENA2, una nueva versión que incorpora la mejora de la trazabilidad de los datos, la invocación a los servicios web de la DGT para incluir de forma automática los campos al registro nacional de vehículos a partir de la matrícula y los campos del registro nacional de conductores a partir del documento de identificación. El esquema de funcionamiento se refleja en la Figura 42.

Figura 42. Esquema de funcionamiento de la aplicación ARENA2. Fuente: Dirección General de Tráfico, 2014

Desde el año 2011 se han incorporado al registro los datos de dos fuentes: por un lado, la de los agentes de tráfico, que recoge información detallada de los accidentes, los vehículos y los factores de influencia en el accidente; por otro lado, la del fichero de fallecidos del Instituto Nacional de Estadística (INE), lo que ha permitido determinar con mayor exactitud la cifra de fallecidos por accidente de tráfico durante el periodo de treinta días posteriores al accidente. Además de estas dos fuentes de dos, hay otras que contienen información sobre accidentalidad que podrían resultar de interés y que a día de hoy no están incorporadas al registro. Por un lado, los registros de información forense, que contienen datos relacionados con las pruebas toxicológicas realizadas a conductores y peatones. Por otro lado, los registros de altas hospitalarias, que contienen datos relacionados con los diagnósticos y con los que se podría conocer el tipo de lesión de las víctimas y la localización de las mismas (ver Figura 43).

Figura 43. Fuentes de información en el Registro Estatal de Víctimas de Accidentes de Tráfico. Fuente: Dirección General de Tráfico, 2014

2. Limitaciones de la base de datos

A pesar de que el registro de víctimas de accidentes de tráfico de España recopila una gran cantidad de variables que permiten identificar y describir el accidente con bastante detalle, esta base de datos presenta numerosas limitaciones. En primer lugar, la toma de datos presenta algunas dificultades. Cuando se produce un accidente, los agentes que acuden a la escena del siniestro, tienen que realizar otras tareas prioritarias, como pueden ser el control del tráfico para la prevención de nuevos accidentes, la asistencia a las víctimas hasta la llegada de los servicios de emergencia o la identificación de los testigos e implicados para recabar la información necesaria. Además, muchos de los datos deben ser tomados de inmediato en la escena del accidente, ya que pueden existir elementos, como pueden ser el fuego o el rescate de las víctimas que destruyen o modifican las pruebas necesarias para su obtención. Todos estos factores suponen una dificultad a la hora de tomar algunos datos en el momento del accidente. Por este motivo, en la base de datos con la que se ha trabajado, muchas de las variables están incompletas para determinados accidentes, sobre todo los datos referentes a las características de la vía, como puede ser el ancho de la calzada, la presencia o no de arcén, etc.; si bien es cierto que muchos de estos datos podrían rellenarse a posteriori. Por otro lado, otra limitación que presenta la base de datos reside en la información que pueden aportar los testigos del accidente. En determinadas ocasiones, esta información, que es clave en la investigación del accidente, está condicionada por la gravedad del estado de la víctima como consecuencia del accidente o simplemente otras veces se niega a testificar o aporta información inexacta con el objetivo de tratar de eximirse de responsabilidades y de este modo evitar sanciones administrativas.

Otro problema con el que nos podemos encontrar que puede afectar a la recopilación completa de los datos de accidentes, es que en numerosas ocasiones el dato que debemos recopilar no es evidente y su obtención depende en gran medida de la realización de un trabajo de investigación muy detallado. Este trabajo de investigación requiere de un equipo multidisciplinar, con amplios conocimientos en ingeniería del tráfico, diseño de carreteras y señalización, principios de psicología relacionados con la conducción, legislación de tráfico o incluso, conocimientos en biomecánica y medicina forense. Todo ello tiene un elevado coste y esto puede suponer un impedimento, que puede dar lugar a que no se lleguen a conocer todos los detalles relativos al accidente, con las consecuentes lagunas de información en su registro.

Asimismo, no debemos olvidarnos de los posibles errores en el proceso de codificación y transcripción de los datos. Los trasposos de información entre diferentes documentos, así como la posible ilegibilidad de datos tomados en campo, pueden ser una fuente de error. Es por este motivo por lo que los formularios de recogida de datos deben contener únicamente la información necesaria, evitando datos redundantes o que puedan ser tomados por otra vía de registro. También son importantes los cambios metodológicos sobre el cómputo de las víctimas que se han ido produciendo con el avance de los años y con el avance del conocimiento y la tecnología. Tal y como vimos en el capítulo II.1, apartado 4.1 del presente documento en 2011 se produjo un cambio en la metodología del cómputo de fallecidos. Hasta ese año, la cifra de víctimas mortales a 30 días se calculaba multiplicando el dato de los fallecidos a 24 horas por un factor corrector. Sin embargo, a partir de 2011, se cruzan los registros de accidentes de tráfico de la Dirección General de Tráfico (DGT) con los datos del Registro de Defunciones del Instituto Nacional de Estadística (INE) y los factores correctores son calculados en función de aquellos datos cruzados de los que se conoce información.

Finalmente, otro punto problemático en la realización de las bases de datos estadísticas que puede provocar que falte información relevante en las mismas, es el seguimiento de las víctimas durante las primeras veinticuatro horas y a los treinta días o la falta de notificación de

determinados accidentes. En determinadas situaciones, los agentes de tráfico clasifican a los heridos en función de la información que reciben de los servicios de emergencia, es decir, en el momento del accidente cuando los servicios de emergencia se encuentran realizando su trabajo, éstos indican si la persona va a ir o no al hospital o si ésta presenta lesiones de gravedad o no. A pesar de que la Orden que regula el registro exige realizar un seguimiento de todos los heridos durante las siguientes 24 horas al accidente, la realidad es que no siempre se realiza. Además, muchas veces son los agentes los que contactan con los servicios sanitarios para recabar información acerca del estado de las víctimas y a veces esta operación no resulta exitosa, bien porque el herido ha sido trasladado a otro hospital o simplemente por el hecho de que los servicios administrativos se niegan a darles información.

3. Comparación entre bases de datos internacionales

El éxito de cualquier investigación sobre seguridad vial está estrechamente vinculado a la calidad de la base de datos de accidentes disponible. El nivel de calidad y desagregación de la base de datos condiciona la metodología analítica y la consistencia de los resultados, los cuales van a servir de ayuda a las autoridades competentes en sus decisiones de mejorar la seguridad vial y reducir los accidentes. Sin embargo, las bases de datos de accidentes generalmente están diseñadas a nivel nacional por la administración en cada país y existen una discrepancia con respecto a la uniformidad de los datos entre países e incluso entre jurisdicciones locales de un mismo país. Además, es necesaria una estandarización en el concepto y definición de diferentes tipos de víctimas de accidentes de tráfico. A continuación, en la Tabla 4 se muestra una comparación internacional de las distintas variables recopiladas en los principales registros de accidentes de todo el mundo (Europa, Estados Unidos, Australia y Nueva Zelanda), que nos ayuda a situar a España en el marco de la seguridad vial internacional.

Como se puede observar en la Tabla 4, algunas variables como la localización del accidente, el tipo de accidente, las condiciones meteorológicas o los factores concurrentes son variables que se recopilan en todas las bases de datos a nivel internacional. Sin embargo, se observa la ausencia total de variables territoriales y socioeconómicas asociadas al punto del accidente. Con respecto a la infraestructura, se recopilan un mínimo de datos de trazado del punto donde ha tenido lugar el accidente, dependiendo de cada país. Por otro lado, con relación a las variables que nos permiten conocer la exposición al riesgo, tan sólo Australia asocia la Intensidad Media Diaria (IMD) al punto del accidente. Para poder analizar la causalidad de los accidentes, todos los factores posibles implicados deberían considerarse, aunque ello exija un trabajo adicional con el objetivo de complementar la base de datos existente.

El registro de accidentes español es una de las bases de datos más consistente y que recoge mayor número de descriptores de las distintas variables. Sin embargo, a pesar de ser una de las bases de datos de accidentes más completas a nivel internacional, uno de los puntos débiles de la base de datos de accidentes de España es que no recoge información acerca del trazado ni del tráfico, a diferencia de las bases de datos de otros países. En España, esta información pormenorizada del trazado de las carreteras no está centralizada, sino que son los distintos titulares de las vías (administraciones, ayuntamientos, conserjerías, etc.) los que tienen esta información en sus inventarios de carreteras. Esto implica una gran dificultad a la hora de recopilar toda esta información. Por otro lado, a día de hoy en España no se está recogiendo el punto mediante coordenadas GPS, como realizan otros países como Estados Unidos o Nueva Zelanda, sino que se emplea el punto kilométrico, que posteriormente es reconvertido mediante un programa informático. Esto puede suponer un inconveniente a la hora de investigar los datos, ya que podría ahorrar mucho tiempo cuando se utilizan por ejemplo determinados software de información geográfica donde es necesario tener localizadas las vías que se están analizando.

Tabla 4. Comparación entre las variables recogidas en los distintos registros oficiales de accidentes de tráfico (EEUU, Unión Europea, Australia, Nueva Zelanda y España). Fuente: Elaboración propia a partir de los trabajos desarrollados por Montella et al., 2012

Variable	Unión Europea ^a	Estados Unidos ^b	Australia	Nueva Zelanda	España
Localización del accidente	Ubicación más precisa posible	Nombre carretera, coordenadas	Nombre carretera, punto de referencia, distancia, dirección	Nombre carretera, coordenadas	Nombre carretera, punto kilométrico
Descripción del accidente	No	No	Sí	Sí	Sí
Croquis del accidente	No	No	Sí	Sí	Sí
Tipo de accidente	Sí	8 descriptores	Sí	Sí	33 descriptores
Condiciones del accidente	No	Circunstancias ambientales	Sí	Sí	Sí
Factores atmosféricos	Sí	10 descriptores	Sí	5 descriptores	9 descriptores
Condiciones de iluminación	Sí	7 descriptores	Sí	7 descriptores	Sí
Accidentes registrados	No especificado	Todos	Todas las lesiones graves	Todas las lesiones graves	Todas las lesiones graves
Definición de heridos	Heridos graves y leves	A: Posible herido grave B: Posible herido leve C: Posible lesión	Heridos ingresados en el hospital Heridos con tratamiento médico requerido	Graves: tratamiento médico requerido Leves: otras lesiones	Heridos hospitalizados Heridos no hospitalizados
Fallecidos	En 30 días	En 30 días	En 30 días	En 30 días	En 30 días
Datos hospitalarios	No	No	En Australia occidental	No	Sí
Causas	No	11 descriptores	No	Numerosos códigos de causas	Sí
Límite de velocidad	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí ^d
Condiciones del asfalto	Sí	10 descriptores	Sí	3 descriptores	9 descriptores
Carretera en curva	No	Sí	Sí	4 descriptores	5 descriptores
Pendiente de la carretera	No	Sí	No	No	No
Edad víctimas implicadas	Sí	Fecha de nacimiento	Sí	Sí ^c	Sí
Sexo	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Nacionalidad	Sí	No	Conductores extranjeros identificados	Conductores extranjeros identificados	Sí
Estado de las lesiones	No	5 descriptores	4 descriptores	Sí	5 descriptores
Acción del conductor	No	19 descriptores	En la descripción del accidente	En la descripción del accidente	23 descriptores
Acción del peatón	No	11 descriptores	En la descripción del accidente	En la descripción del accidente	11 descriptores
Infracciones	No	Sí	Sí	Sí	No
Alcohol	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Drogas	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Elementos de seguridad	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Posición en vehículo	No	Sí	Sí	Sí	Sí
IMD	No	Sí	No	Sí	No
Radio de curvatura	No	Sí	No	Sí	No
Longitud	No	Sí	No	Sí	No

^aDirectiva 2008/96/EC del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre gestión de la seguridad de las infraestructuras viarias

^bGuía del Gobierno federal de los Estados Unidos para la aplicación uniforme de los criterios mínimos. Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras del gobierno de los EE.UU. (NHTSA)

^cSólo las edades de peatones y ciclistas en la lista de accidentes codificados. Otras edades en informes de choques policiales

^dLímite de velocidad registrado desde 2015

^eIntensidad media diaria

4. Clasificación de posibles factores determinantes

Teniendo en cuenta las variables incluidas en la Tabla 4, se ha realizado un esfuerzo por clasificar los posibles factores determinantes en la producción de un accidente:

- **Factores de infraestructura**

Incluyen variables como la pendiente de la vía, el radio mínimo, la consistencia del trazado, el ancho del carril, las marcas viales, etc. La base de datos española proporciona algunos de estos factores, pero las variables de trazado más determinantes no se recogen (pendiente, radio de la alineación circular en planta, etc.). En España la localización del accidente se recoge con el punto kilométrico de la carretera en lugar de las coordenadas GPS, que sería lo más adecuado (como hace EE. UU; ver Tabla 4), dando lugar a problemas en el tratamiento de los datos. En el caso de las travesías, la longitud de la sección de la carretera en la que se produjo el accidente también es importante, pero hay que obtenerlo *ad-hoc*.

- **Indicadores de exposición al riesgo**

El flujo de tráfico en el punto del accidente, medido a través de la IMD, puede ser un factor condicionante, pero este tipo de indicadores rara vez son recopilados por las bases de datos oficiales. Las estaciones de aforo generalmente están lejos del punto del accidente, por lo que se debe llevar a cabo un proceso de asignación de las estaciones a los puntos de accidente. La fecha del accidente (día laborable/festivo, estación del año) y las condiciones meteorológicas podrían considerarse factores de exposición al riesgo y suelen ser recogidos en los registros de accidentes.

- **Variables socioeconómicas del municipio asociadas al punto del accidente (en el caso de accidentes urbanos)**

Incluyen indicadores como la renta per cápita, la tasa de desempleo, el porcentaje de la población de mayores de 65 años y el tamaño de la población. No se recopilan en las bases de datos oficiales, pero se pueden encontrar fácilmente en otras bases de datos oficiales (como las estadísticas del INE en español) y se pueden vincular a cada accidente.

- **Variables de las víctimas (fallecidos, heridos graves, heridos leves)**

Estos datos están normalmente registrados en la base de datos nacional de seguridad vial y no existe una forma alternativa de encontrarlos. Por lo general, incluyen un conjunto mínimo de datos sociales (edad y género), pero también infracciones cometidas, tasas de alcoholemia o resultados de pruebas de drogas.

- **Indicadores territoriales**

Las bases de datos oficiales rara vez incluyen indicadores territoriales asociados a la ubicación del punto del accidente y pocos estudios sobre seguridad vial tratan la relación entre las tasas de accidentalidad y este tipo de indicadores. Hay primeros indicios (y este documento trata de mostrarlos) que apuntan a un determinante territorial en algunos accidentes, pero es un asunto que permanece sin explorar en la literatura. En el caso de las travesías, la separación física generada por la carretera es clara, dividiendo la ciudad en dos áreas diferentes. A nivel local, la ubicación de las actividades en estas dos áreas puede condicionar que los itinerarios peatonales queden seccionados. Por tanto, la travesía genera no sólo una “separación física” de las áreas urbanizadas, sino también una separación de sus centros de actividad más recurrentes (colegios, supermercados, ayuntamiento, bancos, centros de salud, etc.). La localización de los centros de actividad con relación al eje de la travesía va a condicionar los itinerarios peatonales.

Una vez considerados los factores que pueden influir en la existencia de accidentes y su disponibilidad en los registros oficiales, abordaremos las metodologías más habituales para analizar la causalidad de los accidentes.

CAPÍTULO II.5 MODELOS ESTADÍSTICOS EN EL ANÁLISIS DE ACCIDENTES

1. Modelos estadísticos empleados en el análisis de accidentes

1.1. Generalidades

Para mejorar la seguridad vial resulta necesario conocer las causas que dan lugar a los accidentes de tráfico, así como realizar una evaluación de la influencia y los efectos de los factores que intervienen en dichos accidentes. Para ello hay que tratar estadísticamente toda la información que tenemos disponible. En una primera etapa, puede ser útil realizar un análisis exploratorio y descriptivo de los datos, que nos proporcionará una primera aproximación al estudio de los accidentes y una breve visión de lo que está ocurriendo. La siguiente etapa consistirá en emplear diferentes técnicas estadísticas que complementen este primer análisis para así poder obtener una mejor comprensión de los factores causales de los accidentes.

Los modelos estadísticos pueden ser clasificados dependiendo de la información que utilizan y del objetivo que persigan (Morales y Arenas, 2014). Cuando éstos emplean una única variable, se denominan modelos univariantes, mientras que si tenemos más de una variable explicativa, se denominan modelos explicativos. Por otro lado, si lo que pretendemos es determinar el comportamiento de las variables en un instante temporal dado, lo que tendremos es un modelo estático o de corte transversal, como por ejemplo cuando se quiere obtener la relación entre el número de accidentes y vehículos que pasaron por una sección transversal de una carretera en un año determinado. Sin embargo, si lo que queremos es examinar la relación a lo largo del tiempo, lo que tendremos son modelos dinámicos o longitudinales. Los modelos estadísticos se pueden emplear tanto para explicar el efecto de los factores que intervienen como para predecir el comportamiento de los accidentes bajo el supuesto del cumplimiento de ciertos escenarios relativos a la evolución de las variables independientes que intervienen en el modelo.

En la mayoría de los estudios de seguridad vial, lo que se pretende es conocer el modelo de probabilidad que trata de describir el comportamiento de una variable aleatoria, es decir, conocer la proporción de individuos de la variable que toma un conjunto de valores determinado. Por tanto, la variable de interés suele ser la frecuencia de accidentes, esto es, el número que de ellos se producen en un espacio y tiempo determinados. Para realizar esta modelización existen dos grandes grupos de modelos. Por un lado están los modelos “micro”, que se emplean cuando la magnitud es el número de accidentes que tienen lugar en un tramo concreto de vía. Por otro lado, los modelos “macro” se emplean cuando la magnitud es el número total de víctimas en la red de carreteras. No obstante, en muchas otras ocasiones lo que se busca es una variable de tipo cualitativo, como puede ser la gravedad del accidente. En estos casos se deben emplear modelos específicos, como veremos a lo largo de los siguientes apartados.

En todo modelo estadístico, la variable dependiente se puede dividir en dos partes: por un lado estaría la parte sistemática y predecible, y por otro, la parte aleatoria o no predecible. La parte sistemática es aquella que puede ser expresada como una combinación de las variables explicativas del modelo, mientras que la parte aleatoria es la que considera el efecto de las variables no contempladas mediante un término de error. El desarrollo de cualquier modelo estadístico se puede dividir en dos etapas: en primer lugar, se debe elegir el modelo estadístico más adecuado, la formulación matemática de la ecuación que relaciona la variable dependiente que estamos analizando con las variables explicativas o independientes, así como los métodos

de ajuste que vamos a emplear y la diagnosis; en segundo lugar, se deberá realizar la selección de las variables independientes, en función de las que tengamos disponibles.

Los estudios de Smeed marcaron el inicio del análisis de series de datos temporales sobre accidentalidad, que trataban de explicar el número de fallecidos en accidentes por medio de los índices de motorización (Smeed, 1949). Con el paso de los años, la mayor disponibilidad de los datos nos ha permitido profundizar y crear modelos estadísticos mucho más complejos que pretenden explicar con mayor detalle la siniestralidad vial. Desde entonces, se han utilizado infinitos tipos de modelos de análisis y se han realizado numerosos progresos, si bien todavía siguen existiendo múltiples barreras metodológicas en el análisis estadístico de accidentes e innumerables retos del futuro para los investigadores (Mannering y Bhat, 2014).

1.2. Modelos lineales ordinarios

Los primeros modelos de regresión lineal que surgieron para analizar la accidentalidad pretendían modelizar la frecuencia de accidentes y definían esta variable como una combinación lineal de parámetros de la vía, suponiendo la hipótesis de una distribución normal de la variable, un hecho que ha resultado ser una de las principales desventajas en este tipo de modelos. En este tipo de modelos, el comportamiento de la variable dependiente se caracteriza por la suma de una componente sistemática, que se define como una función de variables explicativas, y otra aleatoria. El valor esperado de la variable dependiente es:

$$\mu_i = \sum_{j=1}^k \beta_j X_{ij}$$

Donde:

μ_i es el valor esperado de la variable dependiente

x_{ij} vector de variables explicativas de dimensiones $n \times k$, siendo n el número de observaciones y k el número de variables explicativas

B_j vector de parámetros del modelo, que determina la relación entre la variable dependiente y las variables x_{ij}

Los modelos lineales ordinarios han sido utilizados en incontables análisis estadísticos de seguridad vial, la mayoría de las veces en comparación con otros modelos (Hakim et al., 1991). La complejidad de este tipo de modelos para adaptarse a las particularidades de los accidentes de tráfico ha ocasionado que apenas se hayan empleado en los últimos años, tras los numerosos estudios en la literatura que desaconsejan su uso en este ámbito (Miaou y Lum, 1993). Sin embargo, a pesar de que a día de hoy se cuestionan estos modelos, gracias a ellos se obtuvieron muchos resultados de interés en los años noventa.

1.3. Modelos lineales generales

Los inconvenientes y las limitaciones que presentaban los modelos lineales ordinarios provocaron que se empezasen a utilizar otros modelos, como los modelos lineales generales. Estos modelos tienen la particularidad de que la distribución de la variable que pretendemos modelizar es diferente de la normal. Este modelo en concreto ha sido empleado en numerosas ocasiones en el campo de la investigación de la seguridad vial para modelizar los accidentes de tráfico y son muchos los estudios que han llegado a la conclusión de que los modelos basados en las distribuciones de Poisson o binomial negativa son apropiados para modelar la frecuencia o la tasa de accidentes (Rangel, 2011). Además, también se han realizado estudios que analizan la idoneidad de estos modelos en la modelización de accidentes mediante la comparación con otros modelos y en los que se recomienda la distribución binomial negativa en aquellos casos en los que existe una sobredispersión de los datos (Miaou, 1994). Desde entonces, numerosas

investigaciones han aplicado estos procedimientos, que han sido valorados junto con otros modelos (Lord y Mannering, 2010).

En los modelos lineales generales se amplía el tipo de funciones de unión o lazo disponibles según a naturaleza de la variable dependiente. Para cada distribución existe una función de lazo especial. Conocidos los parámetros de una distribución de probabilidad, la probabilidad de ocurrencia del evento se puede expresar mediante:

$$f(y; \theta, \phi) = \prod_{i=1}^n f(y_i; \theta, \phi)$$

Donde:

y es la variable dependiente que se quiere modelizar

θ es el parámetro canónico o natural de la distribución adoptada

ϕ es el parámetro de dispersión de la distribución adoptada

La función de verosimilitud (valor más probable, que describe como se distribuyen los datos observados), se define como:

$$L(\theta, \phi; y) = \prod_{i=1}^n f(\theta, \phi; y_i)$$

1.3.1. Modelo de Poisson

Este modelo de regresión se emplea para modelizar el número de sucesos determinados que tienen lugar durante un periodo de tiempo concreto, como por ejemplo, el número de accidentes o el número de víctimas que se producen en un año determinado. Las principales particularidades que caracterizan a esta distribución son el hecho de que el número medio de eventos acontecidos por unidad de observación es constante, lo cual quiere decir que la probabilidad de que se produzca un accidente es constante en cada periodo de observación, así como que los sucesos son independientes, esto es, que no depende de los accidentes que se hayan producido anteriormente. Asimismo, la distribución de este modelo asume que la varianza de la variable dependiente es igual que su media.

Dada una variable aleatoria Y que presenta una distribución de Poisson, la probabilidad de que la variable observada sea y_i puede ser expresada como:

$$P(Y_i = y_i) = \frac{e^{-\mu} \mu^{y_i}}{y_i!}$$

Donde:

μ es el parámetro de la distribución

La función lazo entre las variables explicativas y el valor esperado y_i de la variable dependiente se expresa a continuación:

$$\mu = \exp\left(\sum_{j=1}^k \beta_j X_{ij}\right) = \exp(\beta_0 X_{i0} + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik})$$

Donde:

X_{ij} es la matriz de variables explicativas, con i como número de observaciones y j como número de variables explicativas disponibles

β_j es el vector de coeficientes del modelo

Existen numerosos estudios que han empleado este modelo para analizar la accidentalidad vial. Joshua y Garber (1990) utilizaron esta herramienta estadística para determinar la relación entre los accidentes de camiones de gran envergadura y las variables geométricas y de exposición al tráfico. El empleo de estas técnicas en este estudio permitió llegar a la conclusión de que la tasa de cambio de pendiente, el tráfico diario promedio, el porcentaje de camiones y la diferencia de velocidad entre los camiones y el resto de los vehículos influyen en el número de camiones involucrados en accidentes en un tramo de carretera determinado. Unos años más tarde, Miaou (1994) realizó un estudio similar en el que evaluó el desempeño de los modelos de regresión de Poisson y binomial negativo para establecer relaciones entre los accidentes de vehículos pesados y el diseño geométrico de las secciones de carretera. Las conclusiones de este estudio revelaron la idoneidad de estos métodos para este tipo concreto de análisis. Posteriormente, Kumara y Chin (2005) utilizó este modelo para examinar los factores que afectan la frecuencia de los accidentes de tráfico en intersecciones en Singapur. Los resultados muestran que varios factores geométricos, de tráfico y de control del tráfico tuvieron una influencia significativa en la ocurrencia del accidente.

1.3.2. Modelo de binomial negativa

La distribución binomial negativa se emplea cuando los datos observados presentan sobredispersión. Este modelo incluye un parámetro de sobredispersión que no tienen otros modelos, de ahí su utilidad. La probabilidad de que una variable aleatoria Y con una distribución binomial negativa tome los valores observados y_i se puede expresar como:

$$P(Y_i = y_i) = \frac{\Gamma\left(y + \frac{1}{k}\right)}{\Gamma(y + 1)\Gamma\left(\frac{1}{k}\right)} \frac{(k\mu)^y}{(1 + k\mu)^{y+1/k}}$$

Donde:

Γ es la función gamma

K es el coeficiente de sobredispersión

μ es el parámetro de la distribución

La función lazo que proporciona la relación entre la variable dependiente y las variables explicativas es:

$$\mu_i = \exp\left(\sum_{j=1}^p \beta_j X_{ij} + \epsilon_i\right)$$

Donde:

X_{ij} es la matriz de variables explicativas, con i como número de observaciones y j como número de variables explicativas disponibles

β_j es el vector de coeficientes del modelo

ϵ_i es el vector que representa la componente aleatoria, recogiendo las diferencias entre la aproximación para cada valor esperado y el valor observado

Existen numerosas investigaciones que utilizado esta técnica estadística para examinar la accidentalidad vial. En 1998, se llevó a cabo un estudio en el que emplearon un modelo binomial negativo para analizar datos de accidentes y demostrar la idoneidad del uso combinado de este modelo con técnicas clúster para reducir la heterogeneidad (Karlaftis y Tarko, 1998). Unos años más tarde, en otro estudio se simuló una serie de distribuciones de Poisson-gamma utilizando diferentes valores que describen la media, el parámetro de dispersión y el tamaño de la muestra, obteniendo como conclusiones que un parámetro de dispersión estimado de forma poco confiable

puede socavar significativamente las estimaciones empíricas de Bayes, así como la estimación de los intervalos de confianza (Lord, 2006). Posteriormente, Ye et al., (2013) aplicaron un modelo de regresión de Poisson a un total de 275 segmentos de autopistas y obtuvieron como resultados que los factores observados generalmente no tienen el mismo impacto en las frecuencias de accidente en diferentes niveles de gravedad.

1.4. Modelos de variables cualitativas

En aquellos casos en los que la variable dependiente es de tipo cualitativo, para evaluar la influencia de los factores determinantes sobre la variable que estamos estudiando se emplean los modelos de regresión logística. Asimismo, dependiendo de cuál sea la variable respuesta, podemos encontrar diferentes tipos de modelos, como por ejemplo los modelos de regresión logística o modelos logit en aquellos casos en que la variable a estudiar sea binaria y únicamente tenga dos categorías. Por otro lado, si la variable dependiente puede tomar múltiples categorías, entonces se emplean los modelos de regresión multinomiales. Otro tipo de modelos para variables cualitativa son los árboles de clasificación y regresión, que se utilizan para determinar la relación existente entre variables. Estos modelos son los más utilizados cuando lo que se pretende analizar es la gravedad del accidente. Los investigadores Chen y Fan (2019) desarrollaron un modelo logit multinomial para investigar e identificar factores contribuyentes significativos que determinan la gravedad del choque en accidentes con peatones involucrados en Carolina del Norte. Los resultados del análisis permitieron el desarrollo de medidas efectivas para reducir la gravedad de los accidentes de vehículos y peatones y mejorar el rendimiento de seguridad del sistema de tráfico. Unos años antes, Rothman et al. (2012) aplicaron modelos de regresión logística binaria y multinomial para analizar la relación existente entre la gravedad de los accidentes con peatones implicados y la localización del cruce, cuyos resultados revelaron que los cruces en ubicaciones no controladas resultaron provocar una mayor gravedad de la lesión en comparación con los cruces en intersecciones señalizadas.

En la presente tesis doctoral se han empleado modelos de regresión logística binaria y multinomial para analizar la gravedad del accidente en las travesías españolas, desde el punto de vista del peatón y del conductor. El fundamento teórico de estos modelos se expone en el capítulo III.3 del bloque III del presente documento.

BLOQUE III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El presente bloque aborda el diseño metodológico para alcanzar los objetivos planteados. Recordamos que el objetivo principal de esta tesis doctoral es analizar todos aquellos factores que influyen en la gravedad de los accidentes ocurridos en las travesías españolas. El capítulo III.1 describe la metodología empleada para recopilar aquellas variables de interés que complementan a las variables que proporciona el registro de accidentes de la DGT. A continuación, el capítulo III.2 se expone el procedimiento llevado a cabo para la segmentación de los accidentes de cada una de las muestras analizadas. Finalmente, en el capítulo III.3 se especifica la metodología de modelización de la severidad de los accidentes.

CAPÍTULO III.1 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE LA BASE DE DATOS

1. Introducción

Como hemos visto en capítulos anteriores, la comparación entre las bases de datos internacionales realizadas en la presente tesis doctoral puso de manifiesto las debilidades de la base de datos de accidentes española que se encuentra disponible (el Registro Nacional de Víctimas de Accidentes de Tráfico) y la necesidad de buscar una metodología que nos permita incorporar a la misma, con el menor coste y la mayor facilidad posible, nuevas variables que nos den una visión holística del problema. Un primer análisis exploratorio de la muestra de accidentes

en travesías reveló que el perfil del accidente en este tipo particular de vía urbana es un perfil muy concreto, que afecta a un determinado grupo de usuarios vulnerables y que tienen lugar en un escenario en el que factores como la vida cotidiana de la población, su organización territorial y los factores socioeconómicos y demográficos, pueden estar estrechamente relacionados con la casuística de los accidentes de tráfico que tienen lugar en ellas. Por este motivo surge la necesidad de elaborar una nueva metodología que permita recopilar un mayor número de variables que contemplen todos los puntos de vista posibles de la accidentalidad y que sirvan de complemento a las variables proporcionadas por el registro de accidentes de la DGT. Cabe recordar que el registro de accidentes de la DGT tan sólo recopila variables relacionadas con la infraestructura, el vehículo y las víctimas. Con la metodología diseñada se recopilarán factores territoriales que permitirán cuantificar el impacto del efecto barrera y la accesibilidad a los servicios urbanos, así como otros factores relacionado con el trazado y la exposición al riesgo. A continuación, en los siguientes subapartados se detalla el procedimiento llevado a cabo. Todas las variables han sido recopiladas para un total de 832 travesías.

2. Metodología de obtención de factores de infraestructura

A la hora de evaluar la seguridad vial de una carretera, su geometría es importante. Los factores relacionados con la infraestructura incluyen variables como la pendiente de la carretera, el radio mínimo, la consistencia del trazado, el ancho del carril y los arcones, la existencia de marcas viales, etc. Además, no sólo hay que tener en cuenta todos estos parámetros por separado, sino que conocer la interacción de unos con otros es fundamental en el estudio de la siniestralidad. Un factor por sí solo puede no aportar peligrosidad a la vía, pero si lo combinamos con otra característica de la misma puede generar situaciones de riesgo para los usuarios. La base de datos de accidentes española proporciona algunos de estos factores, pero las variables de trazado más determinantes no se recogen (pendiente, radio de la alineación circular en planta, etc.). Ante la inexistencia de un inventario centralizado de carreteras españolas (con independencia de su titularidad), la investigación se ha centrado en la medición de parámetros restrictivos del trazado en planta para la muestra de 832 travesías. La consideración de indicadores de trazado en alzado, definido por una secuencia de rasantes con inclinación uniforme (rectas) y curvas de acuerdo vertical (parábola), se ha desechado, al no disponer la DGT de suficiente precisión en su aplicación denominada “mapa de movilidad” que permite obtener la altimetría de todas las carreteras de España. En esta aplicación se puede obtener la altimetría de cada punto kilométrico de la carretera, pero este nivel de precisión (por punto kilométrico) no permite la obtención de índices de calidad del trazado en alzado para un tramo de carretera reconocidos en la literatura, como el cambio de curvatura vertical (*VCCR*, *Vertical Curvature Change Rate*) o la tasa promedio de curvatura vertical en el tramo (*Tcv*).

2.1. Trazado en planta

2.1.1. Longitud de la travesía

En cuanto a la longitud de la travesía, la mayoría de ellas se han obtenido de una base de datos proporcionada por la Dirección General de Tráfico. Sin embargo, muchas de ellas no se encontraban en esta base de datos y tuvieron que medirse *ad-hoc*, considerando los límites señalizados de comienzo y fin de localidad o, en su defecto, las señales de limitación de velocidad a 50 km/h o fin de limitaciones que se pueden observar en la entrada o salida de las poblaciones, respectivamente. La recopilación de esta variable es de gran importancia, ya que una travesía de mayor longitud podría suponerse, en principio, más conflictiva que otra de menor longitud. Si realizamos un análisis exploratorio de esta variable, observamos que la mayor parte de las travesías con accidentes (60%) presentan una longitud de valor comprendido entre 0,5 y 2 km.

2.1.2. Radio mínimo de la travesía y secuencia de radios

Con relación al trazado en planta, se ha sistematizado el registro de la secuencia de radios de cada travesía. Una de las variables fundamentales y de las más restrictivas del trazado de una carretera es su radio mínimo. El radio mínimo es el valor límite de curvatura para una velocidad específica de acuerdo con el peralte máximo y el coeficiente de fricción transversal máxima. Además, para estudiar el trazado en planta no sólo es importante analizar el radio mínimo, sino que también es necesario obtener la secuencia de radios a lo largo del mismo, con el fin de poder evaluar la consistencia del trazado en planta. La consistencia del trazado en planta puede interpretarse como la relación entre las características geométricas de una carretera y lo que espera encontrarse el conductor al circular por ella. Si estas características son homogéneas a lo largo de todo el tramo, se incrementan las condiciones de seguridad.

Dado que esta información no está disponible en el registro de accidentes de la DGT y en España esta información pormenorizada del trazado de las carreteras no está centralizada, resulta necesario buscar una metodología que permita automatizar la recopilación de toda esta información. Esta metodología nos permitirá definir una aproximación al trazado de la carretera que estamos analizando. Para ello, se ha empleado el software denominado AutoTURN, un programa basado en CAD que simula maniobras de giro de velocidad baja para vehículos de carretera. Se emplea para diseñar vehículos y determinar los rastros de neumáticos y las rutas de barrido. Este software calcula la ubicación y la orientación del vehículo a medida que el usuario mueve el ratón o dirige el vehículo a través de una serie de maniobras. La ruta virtual delineada es una aproximación al trazado de la carretera que estamos analizando. La ruta se puede generar con SmartPath Tools de AutoTURN o la puede crear el usuario en el entorno CAD a partir de una combinación de arcos y tangentes (una polilínea o cadena compleja, o una alineación). AutoTURN incluye series completas de vehículos de diseño estándar para varios países diferentes. Este software únicamente analiza el trazado en planta y no tiene en cuenta el alzado.

Con respecto a la metodología, AutoTURN es un modelo cinético, lo que significa que no toma en consideración las fuerzas resultantes de la inercia del vehículo u otras condiciones de la superficie de la vía que no sean las del pavimento seco. Las limitaciones de giro para vehículos de diseño estándar se basan normalmente en el radio mínimo de giro. El radio mínimo de giro de una ruta generada se determina a partir del ángulo máximo de dirección. El ángulo máximo de dirección es el ángulo máximo en que los volantes pueden girar. Se define como el promedio de los ángulos formados por los volantes a izquierda y derecha con el eje longitudinal del vehículo cuando se giran en su ángulo máximo. También se puede calcular a partir de la velocidad del vehículo, la fricción lateral y el peralte, empleando la siguiente fórmula de la normativa de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO):

$$R = \frac{V^2}{127(e+f)}$$

donde: “R” es el radio medido en metros (m); “V” es la velocidad medida en kilómetros por hora (km/h); “e” es el peralte, que es adimensional (m/m) y “f” es el coeficiente de fricción

Los factores del peralte y la fricción lateral predeterminados utilizados en AutoTURN se basan en valores de AASHTO (2004). El software AutoTURN contiene una amplia biblioteca de vehículos, de diferentes dimensiones y características. El vehículo seleccionado para realizar la simulación de giros ha sido el vehículo denominado “MdF 2016 (ES)”, ya que es el vehículo contenido en la biblioteca de AutoTURN que más se ajusta a las dimensiones y características del turismo más empleado en España. Sus características y dimensiones se muestran a continuación en la Tabla 5 y en la Figura 44.

Tabla 5. Características del vehículo empleado para la simulación realizada con el software AutoTURN para la recopilación de los radios de las travesías. Fuente: elaboración propia

Tipo vehículo	País	Bloqueo-Bloqueo	Batalla	Ángulo máx. de dirección	Largo	Ancho máx.	Altura
Turismo	España	6.0	2.80	24.3 gra	4.80m	1.80m	1.46m

Figura 44. Datos de la planta y el perfil del vehículo tipo seleccionado. Fuente: software AutoTURN

Una vez se ha configurado el espacio de trabajo y seleccionado el vehículo para la simulación, se va trazando manualmente el recorrido a medida que el usuario mueve “el ratón” o dirige el vehículo a través de una serie de maniobras. La ruta virtual delineada es una aproximación al trazado de la carretera que estamos analizando. A continuación, se muestra un ejemplo de medición de una de las travesías de estudio (ver Figura 45).

Figura 45. Ejemplo de medición de radios de una travesía. Fuente: elaboración propia con el software AutoTURN

Una vez hemos trazado la trayectoria del vehículo sobre el trazado en planta de la carretera, el programa genera un informe que contiene toda la secuencia de curvas y rectas contenidas en el eje trazado (ver Figura 46). Una vez se obtuvo el informe de giros, se procedió a seleccionar el radio de giro mínimo de la misma. Como cada travesía está compuesta por un gran número de radios, se desarrolló un programa para automatizar esta tarea (ver Figura 46). Este programa ha sido creado en lenguaje de programación *Visual Basic* (VB) y se encarga de localizar el radio mínimo entre todos los radios de los que se compone cada travesía.

Figura 46. Ejemplo de informe de giros generado por el software AutoTURN (izquierda) e interfaz del programa de selección del radio mínimo de la travesía (derecha). Fuente: elaboración propia con el software AutoTURN

Sin embargo, tener en cuenta el valor del radio mínimo de forma aislada no proporciona información útil acerca de la conflictividad del trazado de la travesía, sino que también es necesario analizar la secuencia de radios y evaluar la consistencia del trazado en planta, que puede interpretarse como la relación entre las características geométricas de una carretera y lo que espera encontrarse el conductor al circular por ella. Los índices de trazado son una medida cuantitativa de las características generales del trazado en un tramo de carretera. Evalúan las características del mismo, tales como los diferentes radios de curvatura, las longitudes de tramos rectos y curvos o las inclinaciones de la rasante a lo largo del tramo, entre otros. Si estas características son homogéneas a lo largo de todo el tramo, se incrementan las condiciones de seguridad. Tienen la ventaja de ser fáciles de medir y de entender y pueden evaluar aspectos del trazado en planta y en alzado.

Para evaluar estos parámetros, se ha creado un programa que tiene como fin la recopilación de los distintos elementos de los que se compone el trazado de las travesías. El programa contabiliza el número de curvas existentes en el trazado en planta de cada travesía y graba los valores de los radios de las alineaciones circulares de las mismas. La recolección de estas variables nos permitirá crear índices de trazado, los cuales sirven para medir cuantitativamente las características generales del trazado en un tramo de carretera. Estos índices evalúan diferentes aspectos del mismo, tales como la curvatura del tramo, el radio promedio, la longitud de las rectas o la relación entre el radio máximo y mínimo, entre otros. Estos parámetros son fáciles de medir y nos dan una visión general de la conflictividad de una vía.

En esta tesis doctoral, se ha obtenido para cada travesía indicadores estandarizados en la literatura (Fitzpatrick et al., 2000) como el radio promedio en el tramo (R_{prom}), la relación entre el radio máximo y el radio mínimo (RR) y la relación del radio mínimo y el radio promedio (CRR). A continuación se desarrollan las expresiones de estos índices.

2.1.3. Radio promedio en el tramo

El radio promedio en el tramo (R_{prom}) representa los valores típicos de radio que el conductor encontrará al circular por la carretera.

$$R_{prom} = \frac{\sum R_i}{N_c}$$

R_{prom} = radio promedio en el tramo (m)

R_i = radio de la curva i (m)

N_c = número de curvas horizontales en el tramo

Si realizamos un análisis exploratorio de los resultados de este índice calculado para las 832 travesías, se puede observar que gran parte de los accidentes presentan un radio promedio entre 200 y 600 metros (54% del total de travesías). Es de esperar que cuanto mayor sea el valor del radio promedio, la travesía es menos conflictiva, ya que los radios serán más cómodos para el conductor y la visibilidad también será mayor. Sin embargo, considerar este indicador de forma aislada no serviría de nada, ya que a pesar de que el radio promedio pueda tener un valor aceptable, el usuario podrá encontrarse alternativamente curvas más amplias o cerradas, que afectarán a la actividad de la conducción. Por tanto, resulta mucho más representativo establecer relaciones con otros parámetros, como por ejemplo la relación entre el radio promedio del tramo con el radio de la curva en la que se encuentra el conductor o con el radio mínimo. Esto nos dará información sobre el grado de consistencia de la carretera, ya que si los radios son homogéneos, la diferencia entre el radio promedio y el mínimo será menor y, por tanto, la vía tendrá una mejor consistencia.

2.1.4. Indicador de relación entre radio máximo y mínimo

La relación entre el radio máximo y el radio mínimo (RR) es un indicador global de la homogeneidad del trazado, siendo 1 su valor ideal.

$$RR = \frac{R_{máx}}{R_{mín}}$$

RR = relación entre radio máximo y radio mínimo

$R_{máx}$ = radio máximo del tramo (m)

$R_{mín}$ = radio mínimo del tramo (m)

Este índice no da información clara acerca de la velocidad ni de las restricciones de velocidad que pueden producirse a lo largo del tramo. Además, si tomamos como ejemplo un valor de 2, éste podría referirse tanto a radios máximos y mínimos de 2000 y 1000 metros, como a valores de 400 y 200 metros, donde las condiciones de circulación son diferentes.

2.1.5. Indicador de relación entre radio mínimo y promedio

La relación entre el radio mínimo y el radio promedio es un índice representativo, ya que compara la situación particular de la curva de radio mínimo con una característica general del tramo (el radio promedio), lo que de por sí da una idea de la homogeneidad del trazado, en cuanto a radios de curvatura se refiere.

$$CRR = \frac{R_{mín}}{R_{prom}}$$

CRR = relación entre el radio mínimo y el radio promedio

$R_{mín}$ = radio mínimo del tramo (m)

R_{prom} = radio promedio en el tramo (m)

Este índice da como resultado valores comprendidos en el intervalo 0-1. Cuanto mayor sea el valor, mayores condiciones de seguridad presenta el tramo de carretera estudiado, pues esto significaría que el trazado presenta una mayor homogeneidad y la diferencia entre el radio mínimo y el radio promedio sería mínima. El valor ideal de este índice es 1.

Sin embargo, no sólo hay que tener en cuenta el radio mínimo y el radio promedio. También es importante tener en cuenta la longitud de la travesía, ya que la peligrosidad se incrementa si además de tener una gran diferencia entre los distintos radios, la longitud de la travesía es pequeña, puesto que el espacio para resolver las transiciones entre radios será menor. Es por este motivo por el que se ha creado un indicador que mide la consistencia de la alineación horizontal, como se puede ver a continuación.

2.1.6. Indicador de relación entre radio mínimo y promedio por longitud

Este índice relaciona el radio mínimo, el radio promedio y la longitud de la travesía. Es importante tener en cuenta la longitud, ya que la transición para salvar una gran diferencia entre radios se realizará de una mejor manera en una travesía de gran longitud que en una de menor longitud. Por tanto, cuanto mayor sea el valor del índice, mayores condiciones de seguridad presentará la travesía, ya que existirá poca diferencia entre el radio mínimo y promedio (mayor homogeneidad) y además la longitud para realizar la transición necesaria para salvar esta diferencia será también mayor.

$$CRRL = \left(\frac{R_{min}}{R_{prom}} \right) * L$$

CRRL= relación entre el radio mínimo y el radio promedio por longitud de travesía

R_{min} = radio mínimo del tramo (m)

R_{prom} = radio promedio en el tramo (m)

L= longitud de la travesía (m)

2.2. Trazado en alzado

Por otro lado, en la presente investigación también se ha analizado la posibilidad de utilizar un indicador del trazado en alzado para las travesías. El trazado de una carretera debe estar coordinado tanto en planta como en alzado, de manera que el usuario de la vía pueda circular por ella en condiciones de comodidad y seguridad. El trazado en alzado de una carretera se compondrá de la adecuada combinación de los siguientes elementos: rasante con inclinación uniforme (recta) y curva de acuerdo vertical (parábola). La armonización entre ambos elementos es fundamental para no afectar significativamente a la percepción del conductor y que no se produzcan pérdidas de trazado, pérdidas de orientación o pérdidas dinámicas. Sánchez, J.F. (2011) diseñó una metodología para la evaluación de la consistencia del trazado de carreteras interurbanas de dos carriles y elaboró diferentes índices que permiten cuantificar la consistencia del trazado en alzado. Además, también demostró a través de un análisis de regresión que existe una relación directa entre el índice de cambio de curvatura vertical en el tramo y el índice de peligrosidad. De ahí la importancia de mantener constante este parámetro geométrico entre tramos consecutivos, al igual que ocurre con la tasa de cambio de curvatura horizontal. A continuación, se muestran los índices propuestos por (Sánchez, J.F., 2011).

2.2.1. Indicador de cambio de curvatura vertical

El cambio de curvatura vertical en el tramo (VCCR) determina los cambios de la pendiente de la rasante que se producen por kilómetro de trazado y es el equivalente a la tasa de cambio de curvatura en planta (CCR).

$$VCCR = \frac{\sum |A_i|}{L}$$

Siendo: “VCCR” es el cambio de curvatura vertical en el tramo (%/km); $|A_i|$ es la diferencia absoluta de inclinaciones en acuerdo i (%) y L = longitud del tramo (km).

Cuanto más llano sea el terreno o más constante sea la inclinación de la rasante, el valor del VCCR será menor. Sin embargo, si tenemos un terreno accidentado y la vía se ajusta a él su valor aumenta, pudiendo superar el 35%/km.

Sin embargo, para poder calcular este indicador, es necesario disponer de datos de las inclinaciones en los acuerdos de los que se compone cada travesía. Esta información no está disponible en el registro de accidentes de la Dirección General de Tráfico, por lo que es necesario la recopilación de datos *ad-hoc*. La DGT ha creado una aplicación denominada “mapa de movilidad” que permite obtener la altimetría de todas las carreteras de España. Sin embargo, no nos permite automatizar este proceso y dada la extensión de nuestra base de datos, la recopilación de estas variables resulta compleja y requiere de un gran esfuerzo. Además, a esto hay que añadir que esta aplicación únicamente nos permite obtener datos de cotas de cada punto kilométrico, por lo que la escala de trabajo no nos permitiría calcular este índice con una gran precisión, teniendo sólo información de cada kilómetro de travesía. Es por este motivo por lo que no se han tenido en cuenta indicadores de trazado en alzado en nuestra base de datos.

A modo de ejemplo, hemos seleccionado una de las travesías con accidentes para calcular este índice. Se trata de la travesía CL-501 situada en Sotillo de la Adrada. Tiene una longitud total de 4 km (PK 13 – PK 17). A continuación, se muestra una imagen obtenida de la aplicación del mapa de movilidad de la DGT (ver Figura 47), así como la información de los diferentes tramos de los que se compone la misma (ver Tabla 6).

Figura 47. Información altimétrica de la travesía de la población Sotillo de la Adrada. Fuente: mapa de movilidad de la Dirección General de Tráfico

Tabla 6. Información altimétrica de los puntos kilométricos de la travesía de la población Sotillo de la Adrada. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del mapa de movilidad de la Dirección General de Tráfico

Tramo	Vértice 1	Vértice 2	Longitud	Inclinación
Tramo 1	PK 17 (681 m)	PK 16 (649 m)	1 km	-3.2 %
Tramo 2	PK 16 (649 m)	PK 15 (642 m)	1 km	-0.7 %
Tramo 3	PK 15 (642 m)	PK 14 (636 m)	1 km	-0.6 %
Tramo 4	PK 14 (636 m)	PK 13 (644 m)	1 km	0.8 %

Una vez calculadas las diferencias absolutas de las inclinaciones para cada tramo, se obtiene un cambio de curvatura vertical en el tramo de travesía de 0.7 %/km. Este procedimiento tendría que llevarse a cabo para cada una de las travesías de nuestra base de datos. De acuerdo a estos rangos, se debe lograr que el valor del cambio de curvatura vertical no sea superior a 5%/km, con el fin de que la consistencia del mismo pueda considerarse como buena. En cambio si este índice está comprendido entre los valores 5 y 10 %/km, la consistencia será calificada como regular. Finalmente, si el valor del índice supera el 10%/km, la consistencia del trazado será mala, situación que debe evitarse (Sánchez, J.F., 2011).

2.2.2. Tasa promedio de curvatura vertical

La tasa promedio de curvatura vertical en el tramo (T_{cv}) hace referencia a la relación entre la longitud de los acuerdos y el cambio en las inclinaciones de la rasante. Indica qué longitud de curvatura vertical es necesaria para lograr un cambio de 1% en la inclinación de la rasante.

$$T_{cv} = \frac{\sum \left(\frac{L_{cv_i}}{|A_i|} \right)}{N_{cv}}$$

Siendo: " T_{cv} " es la tasa promedio de curvatura vertical en el tramo (m/%); " L_{cv_i} " es la longitud de la curva vertical i (m); " $|A_i|$ " es la diferencia absoluta de inclinaciones en acuerdo i (%) y " N_{cv} " es el número de curvas verticales en el tramo

El valor de este índice es menor en carreteras de montaña debido a la corta longitud y gran cantidad de acuerdos y a cambios continuos y progresivos en la inclinación de la rasante, lo que usualmente se asocia con problemas de distancia de visibilidad y aumenta la probabilidad de accidentes. En cambio, en carreteras en terreno llano este índice aumenta, debido a la baja presencia de cambios de pendiente. Sin embargo, no es posible calcular este índice con los datos que disponemos, ya que no tenemos información de la longitud de las curvas verticales ni de los acuerdos existentes en cada tramo. Además, se desconoce si los distintos titulares de las vías (administraciones, ayuntamientos, conserjerías, etc.) tienen esta información pormenorizada del trazado en sus inventarios de carreteras y en el caso de ser así, esta información no estaría centralizada, por lo que implicaría una gran dificultad a la hora de recopilar toda esta información. Es por este motivo por lo que se ha optado por no calcular este índice, si bien resultaría interesante obtenerlo para analizar la influencia de estos factores en la siniestralidad.

2.2.3. Indicador promedio de la diferencia de alturas

La diferencia de alturas promedio (ΔH_{prom}) muestra cuántos metros de cambio de altura se presentan por kilómetro de trazado, teniendo en cuenta los vértices del perfil.

$$\Delta H_{prom} = \frac{\sum |\Delta H_i|}{L}$$

Siendo: " ΔH_{prom} " es la diferencia de alturas promedio (m/km); " $|\Delta H_i|$ " es la diferencia absoluta de altura entre vértices consecutivos (m) y " L " es la longitud del tramo (km)

Cuando la carretera que estamos analizando presenta un relieve llano, el valor de este índice disminuye, mientras que, si tenemos un terreno accidentado, su valor aumenta. En trazados con ascensos o descensos prolongados el índice es menor que en aquellos con muchos cambios de inclinación de rasante. En general puede hablarse de valores de entre 10 y 30 m/km. Asimismo, a pesar de que este índice puede ser un buen indicador de la curvatura vertical del tramo, no tiene en cuenta el valor de las inclinaciones de rasante ni de las características de los acuerdos verticales, por lo que su validez como elemento aislado para establecer la consistencia del trazado es limitada. Si tomamos como ejemplo la travesía anterior para calcular este índice, obtenemos un valor de diferencia de alturas promedio de 26,75 m/km.

Tabla 7. Diferencia de alturas promedio de la travesía de la población Sotillo de la Adrada. Fuente: elaboración propia

Tramo	Vértice 1	Vértice 2	Longitud	Diferencia de altura entre vértices
Tramo 1	PK 17 (681 m)	PK 16 (649 m)	1 km	32 m
Tramo 2	PK 16 (649 m)	PK 15 (642 m)	1 km	7 m
Tramo 3	PK 15 (642 m)	PK 14 (636 m)	1 km	6 m
Tramo 4	PK 14 (636 m)	PK 13 (644 m)	1 km	8 m

Por tanto, a la vista del análisis de indicadores realizado en este apartado, en los que la mayoría de ellos ya han sido utilizados en otros estudios, en nuestro caso podemos concluir que no disponemos de una base de datos adecuada que nos permita obtener todos los parámetros necesarios para su obtención, sobre todo en lo que respecta a los indicadores de trazado en alzado. La falta de interés que ha habido por parte de las administraciones en el análisis de las travesías hasta el momento ha hecho que no existan a día de hoy ni inventarios ni bases de datos a nivel regional ni local en los que podamos obtener este tipo de información con un nivel de precisión tal que se puedan calcular estos indicadores. La obtención de estas variables tiene un coste elevado y requieren de laboriosos procedimientos *ad-hoc*. Por este motivo, en el análisis realizado en la presente tesis se ha decidido seleccionar únicamente aquellos indicadores que se pueden obtener con los recursos existentes, considerando los indicadores de trazado en planta y descartando el análisis de la consistencia del trazado en alzado para futuras investigaciones.

3. Metodología de obtención de indicadores de exposición al riesgo

Otra de las variables más relevantes a la hora de estudiar la accidentalidad de las travesías es la movilidad, ya que una mayor exposición al volante se asocia a una mayor frecuencia de accidentes. Para ello, se ha recopilado como variable la Intensidad Media Diaria (IMD), tanto para vehículos como para vehículos pesados, que hace referencia al número de vehículos que pasan a través de una sección transversal fija de una vía por unidad de tiempo..

Para recopilar esta variable se han empleado los distintos mapas de estaciones de aforo (estatales, autonómicos, locales) que están disponibles (ver Figura 48). Se ha asociado cada punto kilométrico de las travesías donde se ha producido un accidente con su valor de la intensidad media diaria y se ha calculado también el porcentaje de vehículos pesados. Sin embargo, la recopilación de estas variables ha presentado una gran dificultad, ya que muchas travesías no tienen estación de aforo justo en el punto kilométrico del accidente. En estos casos, se ha tomado como IMD de referencia el valor de la estación más cercana afectada.

4. Metodología de obtención de variables socioeconómicas

En el análisis realizado en esta tesis doctoral también se han contemplado las variables socioeconómicas de las poblaciones donde se han producido los accidentes en travesías. Concretamente se han recopilado cuatro variables: el tamaño poblacional, el porcentaje de población mayor de 65 años, la tasa de desempleo de la población y la renta per cápita. Como hemos visto en capítulos anteriores, el registro de accidentes de la DGT no recopila este tipo de variables. Sin embargo, éstas pueden ser obtenidas fácilmente de otras bases de datos oficiales, como por ejemplo el INE y asociarlas con el punto donde ha tenido lugar el accidente.

5. Metodología de obtención de factores territoriales

5.1. Indicador de separación física o efecto barrera

Las travesías son una de las vías más complejas de la red de carreteras, al tratarse de vías que, como su nombre indica, atraviesan una población. En ellas confluyen las elevadas intensidades de tráfico de una carretera interurbana y los inconvenientes propios de la circulación urbana, agravados éstos por la presencia de peatones. Uno de los conflictos más importante que genera una travesía a su paso por la población es la inaccesibilidad transversal (efecto barrera) que genera en la trama urbana que atraviesa, que es tanto más importante según la posición que la travesía tenga en la ciudad y el volumen de tráfico que soporte. Una travesía en la que las zonas edificadas se distribuyen por los dos márgenes de carretera es, en principio, más conflictiva que otra que en la mayor parte de las edificaciones se concentran en un margen, ya que previsiblemente afectará a un mayor porcentaje de la población de la localidad. Dado que gran parte de los accidentes ocurridos en travesías en el periodo 2006-2016 se han debido a atropellos de peatones, se ha decidido valorar este aspecto, con el fin de analizar su influencia en la accidentalidad. Para ello, se han medido las áreas a los márgenes de cada travesía con el fin de crear un indicador capaz de valorar el efecto barrera de la misma. El procedimiento se ha llevado a cabo mediante el software AutoCAD y visualizando ortofotos de las poblaciones afectadas (832 poblaciones), tal y como se puede observar en la Figura 49.

Figura 49. Procedimiento de medición del área edificada a ambos márgenes de la vía, empleado en la elaboración de un índice para valorar el efecto barrera generado. Fuente: elaboración propia

Una travesía en la que las zonas edificadas se distribuyen equitativamente a ambos lados de la carretera es, en principio, más conflictiva que otra en la que la mayor parte de las edificaciones se concentran en uno de los márgenes, ya que previsiblemente afectará a un mayor porcentaje de la población de la localidad. Este índice de separación poblacional tendrá en cuenta la distribución del suelo urbano como relación entre la diferencia de las superficies edificadas en ambos márgenes de la travesía y la superficie total edificada.

$$I_1 = \frac{\text{Área mayor} - \text{Área menor}}{\text{Área total población}}$$

Donde “ I_1 ” es el índice de separación física o de efecto barrera; “Área mayor” hace referencia al área edificada que mayor territorio abarca en uno de los lados de la travesía, medida en metros cuadrados; “Área menor” es el área edificada de menor dimensión de entre las dos existentes, que quedan confinadas en ambos márgenes de la vía, medida también en metros cuadrados; finalmente el valor denominado “Área total población” hace referencia al total del área edificada de dicha población, siendo la suma de los dos valores anteriores (Área mayor + Área menor), medida en metros cuadrados.

Tal y como se observa en la Tabla 8, cuando el valor de este índice se aproxima a 0, la travesía atraviesa la población dividiéndola por la mitad (travesía central), siendo ésta una travesía, en principio, más conflictiva al afectar a un mayor porcentaje de población. Por otro lado, la obtención de un valor del índice I_1 de 0,5 implicaría que la travesía atraviesa la población afectando a un tercio de la misma (travesía lateral grado 2), es decir, dejaría a un lado del margen de la carretera a un 33% de la población. Finalmente, si el valor obtenido está próximo a 1, la carretera no divide a la población, sino que pasa muy próxima a ella, dejando la mayor parte de las edificaciones en uno de los márgenes de la travesía (travesía periurbana). En este caso, se trataría de una travesía, a priori, poco conflictiva, ya que el área de influencia sería menor.

Tabla 8. Tipo de travesía en función de los valores que pueden tomar el índice de separación poblacional y porcentaje de edificación en ambos márgenes de la vía. Fuente: elaboración propia

Índice separación poblacional (I_1)	Edificación Margen 1 – Edificación Margen 2	Tipo de travesía
0,00	50,00% - 50,00%	Travesía central
0,20	60,00% - 40,00%	Travesía lateral grado 1
0,50	75,00% - 25,00%	Travesía lateral grado 2
0,80	90,00% - 10,00%	Travesía lateral grado 3
1,00	100,00% - 00,00%	Travesía periurbana

Además, cuando el paso de la carretera se produce en la parte central de la población, se crean problemas de permeabilidad peatonal, que imposibilitan el paso de los peatones y los ciclistas de un lado de la población a otro en buenas condiciones de accesibilidad y comodidad. Por tanto, se genera una discontinuidad en la red peatonal, una red peatonal que tiene como objetivo interconectar el territorio urbano de modo que la mayoría de sus infraestructuras de transporte, equipamientos y espacios de recreación queden al alcance del ciudadano que se desplaza a pie, garantizando una buena accesibilidad a los centros de actividad cotidianos: centros educativos, centros deportivos, hospitales, edificios institucionales, entidades financieras, supermercados, etc. Además, la ubicación de estos centros de actividad también es muy importante, ya que podría existir una relación entre la distribución de estos puntos de interés y la siniestralidad vial. Por ejemplo, si todos los centros de actividad se sitúan en un único lado de la travesía, esto hará que parte de la población que reside al otro lado tenga que cruzar la travesía para acudir a los mismos, exponiéndose al riesgo de sufrir un atropello. Sin embargo, si estos puntos de interés están distribuidos equitativamente por todo el territorio, la interacción entre los

residentes y el tráfico interurbano se verá reducida. En los siguientes apartados se pretende cuantificar y valorar la probabilidad de cruce de parte de la población afectada a través de la creación de dos nuevos indicadores territoriales.

5.2. Indicador de separación de actividad

Con el fin de medir la influencia que tiene el paso de la travesía en la movilidad peatonal urbana de cada población, se ha considerado emplear un indicador capaz de medir la distribución de los centros de interés a lo largo de la población con respecto al trazado de la travesía. Para ello ha sido necesaria la obtención de una base de datos lo más completa posible de diferentes puntos de interés de cada población bajo estudio. Estos puntos deben estar georreferenciados, con el objetivo de poder analizar la posición de los mismos con respecto a las travesías. Para este análisis, se ha empleado una base de datos de puntos de interés (POI's) de ESRI, atendiendo a las siguientes categorías: colegios/institutos, supermercados, edificios públicos, entidades financieras, hospitales, centros de salud y farmacias (ver Figura 50). Como el objetivo es valorar la permeabilidad peatonal, es importante determinar una distancia máxima a pie. Los estudios de accesibilidad peatonal suelen considerar una distancia entre 800 y 1000 metros, dependiendo del tipo de destino. Sin embargo, esta distancia puede verse reducida cuando tenemos en cuenta ciertos grupos de población, especialmente las personas mayores de 65 años. En este estudio se ha considerado una franja máxima de 1 km a cada lado de la travesía.

Figura 50. Ejemplo de travesía donde se aprecia la ubicación de los puntos de interés a cada lado de la vía. Fuente: elaboración propia

Para poder definir si un punto de interés se encuentra a un lado u otro de la travesía se ha de tener en consideración los siguientes aspectos:

- Este punto no debe estar a una distancia superior a 1000 metros de la travesía.
- El sentido de recorrido de la travesía se ha definido a la hora de la digitalización de la travesía, ya que ello nos va a marcar cómo vamos a definir la posición relativa de nuestro punto de interés con respecto de la travesía.

Por tanto, para establecer nuestro universo de trabajo, teniendo la geometría de todas las travesías el programa ArcGIS, junto con la capa de POIS, se ha definido una franja de 1 km a cada lado de la travesía (un “buffer”), para posteriormente calcular la intersección de esta capa con la capa de POIS. De este modo, obtendremos una nueva capa donde se encuentran localizados todos los puntos de interés existentes a una distancia de 1 km de la travesía. Finalmente, se ha diseñado un “Script de Python” para el programa ArcGIS, donde se calcula la

orientación de digitalización de la travesía, accediendo a las propiedades de la geografía y donde posteriormente, sabiendo esta característica, se verifica si está a un lado u otro. Este procedimiento ha sido posible realizar con aquellas travesías que tenían geometría y que han sido un total de 452 travesías. Para las 380 travesías restantes, no ha sido posible automatizar el procedimiento y ha tenido que realizarse de manera manual.

Una vez hemos obtenido el valor del número de puntos de interés que se encuentran a cada lado de la travesía y el número total de centros de actividad disponibles en cada una de las 832 poblaciones analizadas, se ha procedido a crear un indicador (con estructura muy similar a indicador de separación de población). La fórmula empleada es la siguiente:

$$I_2 = \frac{POIS_zA - POIS_zB}{Tot_POIs}$$

Siendo “ I_2 ” el índice de permeabilidad peatonal o separación de actividad; $POIS_zA$ es el número total de puntos de interés a un lado de la travesía; $POIS_zB$ es el número total de puntos de interés al otro lado de la travesía y el valor denominado Tot_POIs es el número total de puntos de interés de la población.

Tabla 9. Porcentaje de servicios de interés a cada lado de la travesía en función de los valores que puede tomar el índice de permeabilidad peatonal. Fuente: elaboración propia

Índice de permeabilidad peatonal (I_2)	Repartición de servicios a cada lado de la travesía
0,00	50,00% servicios en zona A - 50,00% servicios en zona B
0,20	60,00% servicios en zona A - 40,00% servicios en zona B
0,50	75,00% servicios en zona A - 25,00% servicios en zona B
0,80	90,00% servicios en zona A - 10,00% servicios en zona B
1,00	100,00% servicios en zona A - 00,00% servicios en zona B

Tal y como se puede observar en la Tabla 9, cuando el valor de este índice se aproxima a 0, la mitad de los servicios se concentran en cada uno de los lados de la travesía. A medida que el valor se va incrementando y acercándose a 1, los servicios de interés se van concentrando en uno de los márgenes de la vía.

Una vez se ha calculado este indicador para todas las poblaciones donde han tenido lugar accidentes con heridos graves y fallecidos en travesías, los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el 40% de las travesías presentan valores cercanos a 1 del índice de permeabilidad peatonal. Esto significa que se trata de travesías donde la mayoría de los servicios están ubicados a un lado de la travesía, tratándose, por tanto, de travesías a priori menos conflictivas. No obstante, es importante tener en cuenta que a pesar de que los servicios están ubicados en un solo lado de la travesía, la zona edificada de la población sí puede estar repartida, tal y como se ha podido observar con el índice de separación poblacional, calculado anteriormente. Por tanto, la conflictividad, en este caso, va a depender de cuánta población resida en el margen de la travesía en el que no hay centros de actividad. Este hecho pone de manifiesto que es necesario investigar el diseño de un indicador mixto que considere no sólo el reparto de los centros de actividad, sino también la población residente a ambos lados de la travesía.

5.3. Indicador mixto

Además del indicador de separación física y el indicador de separación de actividad, es necesario crear un indicador mixto que tenga en cuenta la interacción entre estos dos conceptos. Este indicador reflejará la probabilidad de que los residentes en la población crucen la travesía. La expresión propuesta es la siguiente:

$$I_3 = \frac{A_1 \cdot P_2 + A_2 \cdot P_1}{A_T \cdot P_T}$$

donde “ I_3 ” es el indicador mixto que considera la distribución de los centros de actividad y la población residente; “ A_1 ” es el área total edificada en un lado de la carretera; “ A_2 ” es el área total edificada en el otro lado de la vía; “ P_1 ” es el número total de puntos de interés en el área 1 (A_1); “ P_2 ” es el número total de puntos de interés en el área 2 (A_2) y finalmente, los valores denominados “ A_T ” y “ P_T ” hacen referencia al área total edificada y al número total de centros de actividad existentes en la población, respectivamente (ver Figura 51).

Figura 51. Ejemplos de aplicación del indicador mixto. Fuente: elaboración propia

Una vez hemos obtenido y calculado todos y cada uno de los indicadores anteriormente expuestos (indicadores de trazado en planta, variables de movilidad y factores territoriales) en las 832 travesías de estudio, se ha asociado cada una de estas variables con los accidentes que queremos analizar. De este modo, se ha logrado obtener una base de datos mucho más completa y consolidada, que nos va a permitir en una siguiente etapa, modelizar el conjunto de accidentes para conocer qué influencia tienen estas variables en la gravedad de los accidentes. Sin embargo, estos datos de accidentes de tráfico que hemos logrado recopilar tienen un alto grado de heterogeneidad y requieren, previamente a la aplicación de cualquier modelo estadístico, de la aplicación de técnicas de segmentación de accidentes. A continuación, en los siguientes capítulos se expone el procedimiento llevado a cabo para reducir esta heterogeneidad y el fundamento teórico de los modelos estadísticos aplicados.

CAPÍTULO III.2 METODOLOGÍA PARA LA SEGMENTACIÓN DE ACCIDENTES

1. Introducción

Uno de los problemas más importantes del análisis de las bases de datos de accidentes y su modelización, es la heterogeneidad que presentan los accidentes de tráfico, de manera que, si durante el análisis no se tienen en cuenta determinadas relaciones existentes entre las variables, éstas pueden quedar ocultas. Por tanto, es necesario reducir la heterogeneidad antes de proceder a aplicar técnicas de modelación y para ello hay que segmentar los datos. Por esta razón, las técnicas de análisis clúster han sido utilizadas con éxito en la investigación sobre seguridad vial, como método para la segmentación de los accidentes de tráfico (Magidson y Vermunt, 2002; Pardillo-Mayora, Domínguez-Lisa y Jurado-Piña, 2010).

El análisis clúster ha sido el método seleccionado para segmentar los datos, de entre las distintas técnicas estadísticas multivariantes existentes. El análisis clúster, conocido como análisis de conglomerados, se engloba dentro de los métodos conocidos como interdependientes. Se trata de una técnica estadística multivariante que busca la identificación de grupos dentro de una población. Agrupa las variables de manera que se logre la máxima homogeneidad entre las variables de un mismo grupo y la mayor diferencia posible con respecto a otros grupos (Uriel y Aldás, 2005). Al contrario de lo que ocurre con otras técnicas multivariantes, el análisis clúster no

es una técnica explicativa, sino descriptiva, es decir, no emplea la estadística para interpretar la situación objeto de estudio, sino que trata de describir la realidad que se está analizando.

El análisis clúster se puede dividir en cinco etapas claramente diferenciadas, tal y como establecen Aldenderfer y Blashfield (1984) y que son las que se han seguido para llevar a cabo el análisis desarrollado en la presente tesis doctoral. En primer lugar, se deben tener claro los objetivos que se pretenden alcanzar con el análisis de conglomerados, para posteriormente seleccionar la muestra a analizar. El siguiente paso será comprobar que la muestra es representativa para asegurarnos que los resultados que se alcancen son los adecuados y generalizables. Asimismo, se deben detectar los casos atípicos y eliminarlos para que no interfieran en los resultados obtenidos. En segundo lugar, se deben definir las variables que van a ser incluidas en la muestra. Asimismo, se deberá revisar las diferentes unidades en que están expresadas las variables. Una solución puede ser tipificarlas, es decir, restarle al valor de la variable su media y dividirla por su desviación típica, obteniendo variables con media 0 y varianza 1, que serán homogéneas en su dimensión. Esta transformación de las variables evitará que las que posean un rango de valores más amplio influyan en la formación de grupos a través del índice de similitud. No obstante, tal y como se puede observar en la literatura, existen diferentes opiniones acerca de los beneficios que aporta la tipificación a los resultados del análisis (Díaz, 2002). Otro de los problemas que pueden presentar las variables es que pueden estar correlacionadas. Por este motivo hay que revisar la existencia de multicolinealidad.

En tercer lugar, resulta importante destacar que para agrupar los elementos es necesario conocer la distancia entre cada uno de ellos, de manera que los más semejantes o menos distantes se agrupen en conglomerados homogéneos. Hair et al. (1998) establece tres tipos de medidas en función de los objetivos y de las variables:

- 1) Medidas de correlación. Se trata de medidas cuantitativas. Para medir la correlación entre las variables no métricas se pueden utilizar los coeficientes de correlación de rangos de Spearman o de Kendall (Luque, 2012). El más empleado es el coeficiente de correlación entre un par de elementos. Los valores elevados de estos coeficientes de correlación manifiestan una similitud entre los elementos.
- 2) Medidas de distancia. Emplean datos métricos y son las que más se utilizan. Hacen referencia a la semejanza como la proximidad entre los valores de las variables que representan a los elementos analizados. Cuanto mayor sea el valor de la distancia, menos será la similitud entre elementos. Al contrario que en el caso anterior, en esta medida los patrones son distintos para todas las variables, por lo que hay que tener en cuenta la magnitud de los valores (Hair et al., 1999). Las medidas de distancia más utilizadas son las siguientes: la distancia euclídea (raíz cuadrada de la diferencia al cuadrado de cada par de elementos medidos) y la distancia euclídea al cuadrado (es la diferencia al cuadrado de cada par de elementos medidos). También existen otras distancias como la de Minkowski, la de Manhattan y la distancia de Mahalanobis. Ésta última además de tener en cuenta la existencia de multicolinealidad entre variables, permite estandarizar las variables cuando éstas presentan diferentes dimensiones.
- 3) Medidas de asociación. Este tipo concreto de medida se emplea para aquellas variables no métricas en escala nominal u ordinal. En este caso, cuanto mayor es la similitud, mayor va a ser el parecido entre elementos. Las variables binarias requieren el uso de este tipo de medidas. Los índices que se emplean para su medición son el de Sokal y Michener, el de Rogers y Tanimoto y el de Sokal y Sneath.

A continuación, una vez hemos calculado las distancias entre cada una de las observaciones, el siguiente paso es la creación de los grupos con entidades similares. Para ello necesitamos seleccionar el algoritmo de agrupación que vamos a utilizar y el número de grupos en el que vamos a detener nuestro análisis. Existen dos grandes tipos de análisis de conglomerados: los métodos jerárquicos y los métodos no jerárquicos. Los métodos jerárquicos son aquellos que van creando los grupos con una estructura arborescente, de forma que los conglomerados de niveles más bajos van siendo agrupados en otros grupos de mayor nivel. En cambio, los métodos de agrupación no jerárquicos son aquellos que asignan los casos sin que unos dependan de otros.

Métodos jerárquicos

Este método va creando los grupos de forma progresiva, de manera que se van uniendo o separados los mismos en función de su similitud. Los métodos jerárquicos se dividen en dos tipos: por un lado, los métodos de aglomeración, en lo que se parte de cada observación en un grupo distinto y poco a poco se van agrupando en sucesivas etapas aquellas que tengan una mayor similitud hasta reunir en un mismo conjunto a todas las observaciones; por otro lado, los métodos divisivos, que al contrario que el anterior, en este caso todas las observaciones se recogen en un grupo para posteriormente dividirse en grupos más pequeños.

En los métodos jerárquicos aglomerativos, se pueden emplear los siguientes criterios para determinar qué grupos deben unirse en cada paso del algoritmo:

- Enlace simple o vecino más próximo. Para obtener la proximidad entre dos grupos, este método calcula la distancia entre sus objetos más cercanos.
- Enlace completo o vecino más alejado. Al contrario que el caso anterior, en este caso para obtener la proximidad entre dos grupos, este método calcula la distancia entre sus objetos más alejados.
- Enlace medio entre grupos. Para obtener la distancia entre dos grupos, se debe calcular la media ponderada de las distancias entre objetos de ambos grupos antes de la formación de los mismos.
- Método del centroide. Calcula la proximidad entre dos grupos calculando la distancia entre sus centroides, que es igual a la distancia euclídea entre sus centros, siendo éstos los vectores de medias de las observaciones.
- Método de Ward. Este último caso se diferencia de los anteriores en que en vez de partir de la matriz de distancias, parte de los elementos. En cada etapa, se unen los dos conglomerados para los cuales se tenga el menor incremento en el valor total de la suma de los cuadrados de las diferencias, dentro de cada grupo, de cada elemento al centroide del conglomerado.

Por otro lado, en los métodos divisivos, el método más empleado es el de William-Lambert, basado en la distancia chi-cuadrado (Vidal Díaz de Rada, 2002).

Otro de los aspectos importantes en este tipo de métodos de agrupación es la decisión que debe tomar el investigador en cuanto al número de clústeres óptimo. No existe un criterio objetivo ni ampliamente válido, sin embargo es importante tener en cuenta que una mala elección del número de conglomerados puede dar lugar a grupos muy heterogéneos (pocos clústeres) o datos que siendo muy semejantes se agrupen en conglomerados diferentes (muchos clústeres). Aunque no exista un criterio único, sí que se han implementado numerosos métodos que nos facilitan esta tarea, como pueden ser el método del codo, el criterio de Calinsky, el Affinity Propagation o el Gap, entre otros. De la Garza et al. (2013) propone los siguientes que se describen a continuación. En primer lugar, uno de los métodos consistiría en analizar las variaciones porcentuales que sufren los coeficientes de similitud al realizar continuas

agrupaciones. Cuanto mayor sea la variación, mayor será la heterogeneidad, por lo que el número óptimo se situará en el cambio brusco del coeficiente. Otro método consistiría en este mismo procedimiento pero de forma gráfica, a través del dendograma o representando los conglomerados y las distancias.

Métodos no jerárquicos

La diferencia principal de los métodos no jerárquicos con respecto a los jerárquicos es que no se conocen a priori el número de conglomerados que se van a formar. Lo que se pretende es asignar cada observación al grupo que tenga características más similares a las suyas, en donde la distancia de cada observación al punto central sea reducida. El más empleado es el método k-medias, un algoritmo de clasificación no supervisada que agrupa objetos en grupos teniendo en cuenta sus características y minimizando la suma de distancias entre cada objeto y el centroide de su grupo. Se trata de un método recursivo, es decir, una vez se logra el resultado, se vuelven a calcular los centroides y se realiza de nuevo la asignación (Uriel y Aldás, 2005).

Finalmente, la última de las cinco etapas consistiría en validar los resultados e interpretar los grupos obtenidos.

En la presente tesis doctoral se han empleado dos métodos de agrupación para la segmentación de accidentes: el clúster k-medias y el análisis de clases latentes. El primero de ellos, el clúster k-medias, fue aplicado en una primera etapa de la investigación, a un total de 1.535 accidentes que tuvieron lugar en travesías españolas durante el periodo 2006-2016 y que involucraban a un solo vehículo y a un único peatón. El objetivo de este primer estudio fue analizar la influencia de los factores de infraestructura, las características del accidente y de las víctimas y las infracciones cometidas, en la gravedad de las lesiones de los peatones como consecuencia de los accidentes de tráfico. Se decidió en esta primera etapa emplear este método porque destaca por su sencillez y velocidad de su algoritmo y también porque es uno de los métodos de agrupamiento más utilizados en el análisis de la severidad del accidente. Sin embargo, esta técnica de análisis clúster tiene algunas limitaciones, como por ejemplo que requiere conocer de antemano el número de conglomerados y sus centros iniciales y también que presenta problemas de robustez frente a "outliers". Por este motivo, para el siguiente análisis en el que se requirió del empleo de técnicas de segmentación, se decidió buscar otra metodología de análisis clúster: el clúster de clases latentes. Este método de agrupación está basado en la probabilidad de clasificación a partir de un modelo, en lugar de basarse en algoritmos ciegos de agrupamiento por distancias o similitudes. Además, tiene otra ventaja y es que de este modelo se pueden obtener medidas de ajuste que orientan al investigador sobre cuál es la mejor agrupación, por lo que la elección del número de clases es menos arbitraria que en el clúster tradicional. Por tanto, para analizar la accidentalidad vial desde el punto de vista de los conductores se aplicó un análisis clúster latente. En este caso se segmentaron en diferentes grupos un total de 1.064 accidentes con un solo vehículo implicado, que tuvieron lugar en travesías españolas durante el periodo 2006-2016. El objetivo de este tercer análisis fue analizar la influencia de los factores de infraestructura, las características del accidente y de las víctimas, las infracciones del conductor, los factores territoriales y los indicadores de exposición, en la gravedad de las lesiones de los conductores como consecuencia de los accidentes de tráfico. Cabe recordar que para el análisis de los peatones de edad avanzada (el segundo análisis realizado) no fue necesario aplicar técnicas de agrupamiento, puesto que en este caso la muestra era muy reducida y se analizó un grupo de accidentes muy concreto, con características homogéneas. En definitiva, en este caso la muestra ya conformaba un único grupo homogéneo. A continuación, se expone el marco teórico de cada uno de estos métodos.

2. Clúster k-medias

2.1. Fundamento teórico

El análisis de conglomerados de *K-medias* (MacQueen, 1967) es un método de agrupación de casos basado en las distancias existentes entre ellos en un conjunto de variables. Este método agrupa las observaciones en *K clusters* distintos, donde el número óptimo de conglomerados lo determina el investigador antes de ejecutar el algoritmo. Se basa en lograr encontrar los *K* mejores *clusters*, entendiendo como mejor clúster aquel cuya varianza interna sea lo más reducida posible. Es, por tanto, un problema de optimización en el que se reparten las observaciones en *K clusters* de modo que la suma de las varianzas internas de todos ellos sea lo menor posible. El procedimiento sigue una manera simple y fácil de clasificar un conjunto de datos dado a través de un cierto número de grupos (supongamos que *k* grupos) fijados a priori. La idea principal es definir *k* centroides, uno para cada grupo. Estos centroides deben colocarse de una manera astuta porque la ubicación diferente produce resultados diferentes. Entonces, la mejor opción es colocarlos lo más lejos posible el uno del otro. El siguiente paso es tomar cada punto que pertenece a un conjunto de datos determinado y asociarlo al centroide más cercano. Cuando no hay ningún punto pendiente, se completa el primer paso y se realiza una agrupación temprana. En este punto, tenemos que volver a calcular *k* nuevos centroides como baricentros de los grupos resultantes del paso anterior. Después de tener estos *k* nuevos centroides, se debe hacer un nuevo enlace entre los mismos puntos de ajuste de datos y el nuevo centroide más cercano. Se ha generado un bucle. Como resultado de este bucle, podemos notar que los *k* centroides cambian su ubicación paso a paso hasta que no se realicen más cambios. En otras palabras, los centroides ya no se mueven. Finalmente, este algoritmo apunta a minimizar una función objetivo, en este caso una función de error al cuadrado.

El programa que hemos empleado para realizar este análisis es el SPSS, diseñado por la empresa *IBM*.

Considérese $C_1, \dots, C_K$ como los sets formados por los índices de las observaciones de cada uno de los conglomerados. Todos los sets satisfacen dos propiedades:

$C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_K = \{1, \dots, n\} \rightarrow$ Toda observación pertenece al menos a uno de los *K* clusters.

$C_k \cap C_{k'} = \emptyset$ para todo $k \neq k' \rightarrow$ Implica que ninguna observación pertenece a más de un clúster.

La varianza interna de un clúster $W(C_k)$ se puede definir como:

- La suma de las distancias euclídeas al cuadrado entre cada observación (x_i) y el centroide (μ) de su clúster. Esto equivale a la suma de cuadrados internos.

$$W(C_k) = \sum_{x_i \in C_k} (x_i - \mu_k)^2$$

- La suma de las distancias euclídeas al cuadrado entre todos los pares de observaciones que forman el clúster, dividida entre el número de observaciones.

$$W(C_k) = \frac{1}{|C_k|} \sum_{i, i' \in C_k} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2$$

El objetivo es minimizar la suma total de la varianza interna. Sin embargo, realizar este proceso de forma exacta (encontrar el mínimo global) es un proceso muy complejo debido a la inmensa cantidad de formas en las que *n* observaciones se pueden dividir en *K* grupos. No

obstante, es posible obtener una solución que logra un óptimo resultado. El algoritmo empleado para ello es el siguiente:

- 1) Designar de forma aleatoria un número entre 1 y K para cada observación. Este proceso sirve como asignación aleatoria de las observaciones a los conglomerados.
- 2) Iterar los siguientes pasos hasta que la asignación de las observaciones a los conglomerados no cambie o se alcance un número máximo de iteraciones.
- 3) Para cada uno de los conglomerados calcular su centroide. El centroide es la posición definida por la media de cada una de las dimensiones de las observaciones.
- 4) Asignar cada observación al clúster cuyo centroide está más próximo.

2.2. Ventajas y desventajas del análisis clúster k-medias

Esta metodología de análisis clúster es una de las más utilizadas en diferentes ámbitos de la ciencia. La principal ventaja del mismo es que es un método muy sencillo y destaca por la velocidad de su algoritmo. Sin embargo, presenta una serie de limitaciones o desventajas que deben de tenerse en cuenta a la hora de elegir este método. Una de esas desventajas es que requiere que el investigador indique de antemano el número de conglomerados que se van a crear. Esto puede ser complicado si no se dispone de información adicional sobre los datos con los que se trabaja. Por otro lado, otra de las limitaciones con la que nos podemos encontrar es que las agrupaciones resultantes pueden variar dependiendo de la asignación aleatoria inicial de los centroides. Este problema puede reducirse repitiendo el proceso numerosas veces y seleccionando como resultado definitivo aquel que tenga una menor suma total de la varianza interna. Finalmente, la última de las limitaciones es que este método presenta problemas de robustez frente a “outliers”. Se deben eliminar o excluir estos valores atípicos o recurrir a otros métodos más robustos.

3. Análisis de clases latentes

3.1. Fundamento teórico

El análisis de clases latentes (LCA) es una herramienta estadística capaz de proporcionar las relaciones existentes entre las variables observadas, considerando que la estructura de relaciones subyacentes es explicada por una variable latente categórica (no observada). Las variables latentes son aquellas que no pueden ser medidas directamente. En cambio, las variables manifiestas pueden ser medidas mediante observaciones directas. Esta herramienta estadística clasificatoria está basada en la estimación de probabilidades condicionales, permitiendo analizar variables medidas en diferentes métricas, especialmente datos categóricos (Magidson y Vermung, 2004).

El análisis de clases latentes (LCA) es muy similar en cuanto a objetivos al análisis clúster tradicional, en el cual se pretende encontrar grupos o tipos de casos en función de los datos observados, de modo que el grado de similitud sea máximo dentro de los grupos y mínimo entre los grupos. Una diferencia notable es que el análisis de clases latentes se basa en un modelo probabilístico y se asume que los datos se generan a partir de una mezcla de distribuciones de probabilidad subyacente, mientras que en el análisis clúster tradicional la asignación de los sujetos u objetos a las clases se realiza basándose en medidas de distancia.

El programa que hemos empleado para realizar este análisis es el LatentGOLD v.5.1., diseñado por la empresa *Statistical Innovations*.

A continuación, se muestra la metodología del análisis de clases latentes: Dada una muestra de datos de N casos (o accidentes), medida con un conjunto de variables observadas, $Y_1, \dots, Y_j$, que se consideran indicadores de una variable latente X; y donde estas variables forman

un modelo de clase latente con T clases. Si cada valor observado contiene un número específico de categorías: Y_i contiene I_i categorías, con $i=1, \dots, j$; entonces las variables manifiestas hacen una tabla de contingencia múltiple con $\prod_{i=1}^j I_i$ patrones de respuesta. Si π indica probabilidad, entonces $\pi(X_t)$ representa la probabilidad de que un caso seleccionado al azar pertenezca a la clase latente t , con $t=1, 2, \dots, T$.

El modelo de clases latentes se expresa mediante la siguiente formulación matemática:

$$\pi_{Y_i} = \sum_{t=1}^T \pi_{X_t} \pi_{Y_i|X_t}$$

donde:

Y_i es el vector del patrón respuesta del caso i

$\pi(X_t)$ es la probabilidad previa de pertenencia al cluster t

$\pi_{Y_i|X_t}$ es la probabilidad condicional de que un caso seleccionado al azar tenga un patrón de respuesta $Y_i = (y_i, \dots, y_j)$, dada su pertenencia a la clase t de la variable latente X . La independencia local es el supuesto subyacente que debe verificarse.

$$\pi_{Y_i} = \sum_{t=1}^T \pi_{X_t} \prod_{i=1}^j \pi_{Y_{ij}|X(t)}$$

donde:

$$\sum_{i=1}^j \pi_{Y_{ij}|X(t)} = 1; \sum_{t=1}^T \pi_{X_t} = 1$$

La estimación del modelo se basa en la naturaleza de las variables manifiestas. El método de máxima similitud es el método más utilizado para estimar los parámetros del modelo. Una vez que el modelo ha sido estimado, los casos se clasifican en diferentes clases utilizando el teorema de Bayes para calcular la probabilidad a posteriori de que cada sujeto n provenga de la clase t .

$$\pi_{X_t|Y_i} = \frac{\pi_{X_t} \pi_{Y_i|X_t}}{\pi_{Y_i}}$$

3.2. Ventajas y desventajas del análisis de clases latentes

La ventaja del análisis de clases latentes frente a otros métodos de análisis de conglomerados, como lo es el clúster jerárquico tradicional, es que el clúster latente permite emplear variables que fueron medidas en diferentes métricas, es decir, pueden ser variables categóricas o numéricas. Las variables categóricas son aquellas que contienen un número finito de categorías o grupos distintos y que no tienen por qué seguir un orden lógico. Por otro lado, las variables numéricas son aquellas en las que cada observación tomó un valor numérico que representa diferentes magnitudes del atributo que se mide. Además, en el clúster latente no se necesita estandarizar las variables, a diferencia del análisis clúster tradicional, donde se estandarizan las variables con el fin de homogeneizar varianzas y evitar obtener clústeres dominados por las variables con varianza muy grande.

Otra de las ventajas que presenta el análisis de clúster latente frente a otras metodologías clúster es que la elección del número de clases es menos arbitraria, ya que este método proporciona estimadores estadísticos que permiten evaluar el ajuste del modelo y determinar el número óptimo de clases latentes. En las herramientas clasificatorias tradicionales, como el clúster jerárquico o el clúster con K-medias, se emplean algoritmos basados en la distancia de un objeto a otro (generalmente mediante distancias euclidianas). En estos análisis de agrupamiento

no existen estimadores estadísticos que permitan determinar el número apropiado de conglomerados, por lo que es el investigador quien tiene que determinar en cuántos segmentos puede dividirse la población (Everitt, Sabine y Morven, 2001).

3.3. Estimación de parámetros

Los parámetros del modelo de clases latentes se estiman por el método de máxima verosimilitud (ML), es decir, que la solución consiste en valores de parámetros que maximizan la función de probabilidad y su logaritmo natural. La verosimilitud de un modelo se define como la probabilidad de que cada conjunto de datos haya sido generado por el modelo. Su expresión es la siguiente:

$$\ln(\theta) = \prod_{i=1}^n f(y_i|\theta)$$

donde:

y_i representa un conjunto de datos particular

n es el número de casos θ y comprende los parámetros del modelo

Dado que $\ln(\theta)$ (o simplemente L) siempre es un valor muy pequeño, se utiliza el logaritmo ($\log L$ o LL), ya que es una función monótona creciente y no afecta el orden de las mediciones. De este modo, el producto pasa a ser una suma:

$$\text{Log } \ln(\theta) = \sum_{i=1}^n \log f(y_i|\theta)$$

Asimismo, debido a que esta función es siempre negativa y pequeña, generalmente se utiliza menos dos veces el logaritmo de verosimilitud ($-2LL$), que varía entre $[0, \infty)$.

3.4. Selección del número de clústeres óptimo

Una vez que conocemos cómo modelar clases latentes, otra herramienta imprescindible es la que nos permite valorar cuál de los modelos propuestos se ajusta mejor a los datos que estamos analizando. Dado que el número de agrupaciones en clústeres es desconocido al principio, el objetivo es encontrar el modelo que pueda explicar o adaptar mejor a los datos que se utilizan. En este estudio hemos utilizado varios criterios de información para descubrir el modelo que proporciona más información sobre la realidad. Estos criterios son: el criterio de información Bayesiano (BIC) (Raftery, 1986), el criterio de información de Akaike (AIC) (Akaike, 1987) y el criterio de información de Akaike consistente (CAIC) (Fraley y Raftery, 1998). En el análisis de clases latentes, el estadístico más usado para evaluar el ajuste de los modelos de clases latentes es el criterio de información bayesiana (BIC) y es el estadístico que hemos empleado en el presente estudio. Su fórmula matemática es la siguiente:

$$\text{BIC} = -2 \ell(\theta|x) + p \log(n)$$

donde:

$\ell(\theta|x)$ es el valor maximizado del logaritmo de la función de verosimilitud

p es el número de variables explicativas del modelo (incluyendo la constante)

n es el tamaño de la muestra

En contextos de agrupación, el criterio BIC ha mostrado un mejor desempeño que otros criterios. En general, cuanto menor sea el valor de los indicadores, mejor será el modelo, porque se adapta mejor a los datos. No obstante, cuando se analizan muestras grandes, el BIC y otros criterios a menudo no alcanzan un valor mínimo con un número creciente de grupos. En ese caso, se debe analizar el porcentaje de reducción de BIC entre modelos en competencia y se deben utilizar criterios adicionales, como la entropía, para seleccionar el número óptimo de conglomerados. La entropía varía entre 0 y 1 y los valores superiores a 0,90 denotan una clara

diferenciación de conglomerados y también la interpretabilidad de los clústeres. La entropía viene definida por la siguiente fórmula:

$$I(t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \pi_{X_t|Y_i} \ln(\pi_{X_t|Y_i})}{N \ln(1/T)}$$

Asimismo, para evaluar el ajuste del modelo se emplea el estadístico χ^2 de Pearson y la razón de verosimilitud (L^2):

$$\chi^2 = \sum_y \frac{(obs - esp)^2}{esp}$$

$$L^2 = 2 \sum_y obs \log\left(\frac{obs}{esp}\right)$$

Ambos estadísticos tienen distribución chi-cuadrado asintótica, lo cual significa que esa distribución es una buena aproximación cuando el número de observaciones en cada celda es suficientemente grande y si el valor obtenido es menor que un valor crítico determinado (usualmente 0,05) se considera que el modelo no ofrece un buen ajuste a los datos.

CAPÍTULO III.3 METODOLOGÍA PARA LA MODELIZACIÓN DE LA SEVERIDAD

1. Introducción

El concepto de severidad de un accidente de tráfico hace referencia al daño que se puede producir a un usuario de la red de carreteras si el riesgo se materializa. La severidad del accidente se ha definido conforme a las más severas consecuencias resultantes para cualquier víctima implicada en el accidente. De este modo, la severidad de una lesión puede representarse mediante una serie de categorías discretas. Existen diferentes escalas que permiten clasificarla, como la escala KABCO o la escala AIS (Abbreviated Injury Scale), entre otras (Burch, Cook y Dischinger, 2014). En nuestro caso, vamos a emplear la clasificación establecida por la DGT que define la severidad del accidente de acuerdo a tres categorías: accidentes con heridos leves, accidentes con heridos graves y accidentes mortales. Recordamos que la principal hipótesis que se plantea en esta tesis doctoral se basa en que existe una dependencia de las variables que rodean al accidente y los daños que puede sufrir cada uno de los usuarios implicados en el accidente (conductores o peatones). Adicionalmente, y como hipótesis derivada de la anterior, se plantea si es posible proponer un modelo estadístico que permita predecir estos daños en el caso de que ocurriera un accidente. Por tanto, para modelar la mencionada dependencia, en este trabajo de investigación se plantea el uso de técnicas estadísticas que permitan conocer las relaciones existentes entre los factores que hemos recopilado anteriormente (territoriales, de exposición, de infraestructura y socioeconómicos) y la severidad del accidente. Las técnicas estadísticas que nos van a permitir alcanzar este objetivo propuesto son los modelos de regresión logística.

Los modelos de regresión logística son modelos estadísticos que se utilizan cuando se pretende conocer la relación existente entre una variable dependiente cualitativa y una o más variables explicativas independientes llamadas covariables, ya sean cualitativas o cuantitativas. Las variables dependientes cualitativas pueden ser dicotómicas, en el caso de la regresión logística binaria, o con más de dos categorías, que en este caso hablaríamos de regresión logística multinomial. Los modelos de regresión logística tienen tres propósitos:

- Cuantificar la relevancia de la correlación existente entre cada una de las variables explicativas independientes y la variable dependiente.

- Aclarar si existe una interacción entre las variables explicativas independientes respecto a la variable dependiente, es decir, los *odds ratio* de cada covariable.
- Catalogar individuos dentro de las categorías de la variable dependiente, en función de la probabilidad que tenga de pertenecer a una de ellas.

Por tanto, a diferencia de la regresión lineal que lo que pretende es predecir el valor de la variable Y a partir de una o varias variables predictoras (X_s), la regresión logística lo que intenta es predecir la probabilidad de que ocurra Y conocidos los valores de las variables X_s . Además, en los modelos de regresión logística las variables no tienen por qué ser cuantitativas ni cumplir los supuestos de normalidad. La expresión matemática general del modelo tiene la siguiente forma:

$$P(Y) = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n)}}$$

Donde $P(Y)$ es la probabilidad de que ocurra Y , e es la función exponencial y el resto de coeficientes son análogos a los de la regresión lineal.

Los valores resultantes de esta expresión matemática varían entre 0 y 1. Un valor resultante cercano a 0 significaría que es muy improbable que Y haya ocurrido, mientras que un valor cercano a 1 significaría que es muy probable que haya sucedido. Al igual que sucede con la regresión lineal, en la regresión logística cada variable predictora de la expresión tiene su propio coeficiente. Los valores de los parámetros se calculan empleando el método de máxima verosimilitud, seleccionando los coeficientes que hacen más probable que los valores observados ocurran. A partir de los coeficientes de regresión resultantes (β) del modelo, se puede obtener directamente los *odds ratio* de cada uno de ellos ($OR = e^\beta$), que hace referencia al riesgo de tener el resultado o efecto evaluado para un determinado valor (x) respecto al valor disminuido en una unidad ($x-1$). O lo que es lo mismo, si la covariable es una variable cuantitativa, la *odd ratio* que resulta representa la probabilidad del evento predicho que tiene un individuo con valor ($x-1$).

En la presente tesis doctoral se emplearon dos tipos de modelos de regresión para la modelización de la severidad del accidente, en función de la muestra y de las categorías de la variable dependiente: modelos de regresión logística multinomial y modelos de regresión logística binaria. El primero de ellos, la regresión logística multinomial, fue aplicado en una primera etapa de la investigación, a un total de 1.535 accidentes que tuvieron lugar en travesías españolas durante el periodo 2006-2016 y que involucraban a un solo vehículo y a un único peatón. En esta primera fase del estudio únicamente se analizaron variables contenidas en el registro de accidentes de la DGT y la muestra estaba formada por accidentes con fallecidos, heridos graves y heridos leves. El objetivo de este primer análisis fue analizar la influencia de los factores de infraestructura, las características del accidente y de las víctimas y las infracciones cometidas, en la gravedad de las lesiones de los peatones como consecuencia de los accidentes de tráfico. Por tanto, la variable dependiente del modelo fue la severidad de las lesiones del peatón. Dado que esta variable puede tomar tres categorías (fallecido, herido grave o herido leve), el modelo de regresión logística más apropiado en este caso fue la regresión logística multinomial. Los resultados de este modelo revelaron dos aspectos fundamentales que definieron los pasos de la siguiente etapa de la investigación: por un lado, se demostró que uno de los grupos más afectados fueron los peatones de edad avanzada (mayores de 65 años); por otro lado, los resultados manifestaron la necesidad de incorporar otro tipo de variables que caracterizaran las particularidades de las travesías, con las que poder valorar la influencia de los factores territoriales, la movilidad y los indicadores socioeconómicos en la gravedad de los accidentes. Estos hechos nos llevaron a plantear un segundo análisis, cuyo objetivo fundamental consistió en examinar la influencia de estas nuevas variables en la siniestralidad vial de los peatones. Sin

embargo, la inexistencia de bases de datos en España que recojan este tipo de variables supuso un obstáculo a la hora de examinar la base de datos al completo. El tamaño de muestra de peatones hace inviable la recopilación de todas estas variables para cada una de las travesías, ya que estas variables deben ser recopiladas con costosos procedimientos *ad-hoc*, como se ha podido comprobar en el capítulo anterior. Por este motivo, se decidió seleccionar una segunda muestra más reducida, en la que se contemplaron únicamente accidentes con fallecidos o heridos graves en las que había habido implicado un conductor o un peatón de edad avanzada (mayores de 65 años). Por tanto, en esta segunda etapa de la investigación, se analizaron un total de 225 accidentes que tuvieron lugar en travesías españolas durante el periodo 2006-2015 y que involucraban a un solo vehículo y a un único peatón, en los que alguno de ellos tenía más de 65 años. El objetivo de este segundo análisis fue analizar la influencia de los factores de infraestructura, las características del accidente y de las víctimas, los indicadores socioeconómicos de la población, la movilidad y los factores territoriales, en la gravedad del accidente. En este caso, al estar la muestra formada únicamente por accidentes con fallecidos y heridos graves, la variable dependiente del modelo sólo tiene dos categorías, por lo que el modelo de regresión que se utilizó fue la regresión logística binaria. Los resultados de este segundo estudio revelaron que las variables de infraestructura, los factores territoriales y los indicadores de movilidad influyen significativamente en la gravedad de los accidentes. Además, las conclusiones de este análisis pusieron de manifiesto la importancia de considerar este conjunto de variables en el análisis de la siniestralidad vial. Por este motivo, se decidió ampliar la base de datos de variables recopiladas y se calcularon todos estos indicadores que vimos en el capítulo anterior para todas las travesías con fallecidos y heridos graves durante el periodo 2006-2015.

Finalmente, una vez analizados los accidentes en travesías desde el punto de vista del peatón, surgió la necesidad de analizarlos desde otra perspectiva: la perspectiva del conductor. En este caso, dados los buenos resultados obtenidos en la etapa anterior, se decidió ampliar la muestra de accidentes, considerando los heridos leves, además de los fallecidos y heridos graves. De este modo, la muestra sería mucho mayor y más adecuada desde el punto de vista estadístico. Para ello se extrajeron de la base de datos todos aquellos accidentes (con fallecidos, heridos graves y heridos leves) con un solo vehículo implicado que habían tenido lugar en las 832 travesías de las que habíamos calculado previamente las variables medidas *ad-hoc*, dando lugar a una muestra total de 1.064 accidentes. El objetivo de este último análisis consistió en analizar la influencia de los factores que había resultado ser más significativos en la etapa anterior, en la gravedad de las lesiones del conductor. En este caso, como volvemos a tener tres categorías en la variable dependiente (fallecido, herido grave y herido leve), el método de regresión logística que se empleó fue el multinomial.

A continuación, se expone el fundamento teórico de cada uno de estos dos modelos estadísticos, así como las particularidades de su aplicación a cada una de las muestras analizadas en esta investigación.

2. Modelos de regresión logística multinomial y binaria

Los modelos de regresión logística binaria son uno de los más utilizados, ya que muchos de los fenómenos en las ciencias experimentales responden a este modelo. Tal y como hemos visto en el apartado anterior, en el caso de la regresión logística binaria, la variable dependiente será una variable dicotómica, es decir, que únicamente tendrá dos valores.

2.1. Formulación e interpretación de los modelos

Para los modelos de regresión logística binaria, si tenemos una variable dependiente Y , que toma valores $Y=1$ (presencia de una característica u otra categoría de la variable) y $Y=0$

(ausencia de la característica o la otra categoría de la variable), la ecuación de partida del modelo viene dada por:

$$P[Y = 1|X] = \frac{\exp(b_0 + \sum_{s=1}^n b_s x_s)}{1 + \exp(b_0 + \sum_{s=1}^n b_s x_s)}$$

donde $P[Y = 1|X]$ es la probabilidad de que Y tome el valor 1, en presencia de las covariables X , que lo denotaremos por $p(X)$.

X es un conjunto de n covariables $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ que forman parte del modelo; b_0 es la constante del modelo o término independiente y los b_i son los coeficientes de las covariables.

Esta ecuación inicial del modelo es de tipo exponencial, pero se realiza su transformación logarítmica (logit) para permitir su uso como una función lineal y que la interpretación se más fácil:

$$\ln \left[\frac{p(X)}{1 - p(X)} \right] = b_0 + \sum_{s=1}^n b_s x_s$$

En el caso de que la variable dependiente tenga más de dos categorías, se utiliza el modelo de regresión logística multinomial que se modela, como se indicó anteriormente, mediante varios logits simultáneamente, uno para cada una de las restantes categorías respecto a la categoría de referencia que se haya considerado de la variable dependiente.

Consideremos una variable de respuesta politémica Y con más de dos categorías de respuesta que denotaremos por $Y_1, Y_2, \dots, Y_k$.

Se pretende explicar la probabilidad de cada categoría de respuesta en función de un conjunto de covariables $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ observadas. Es decir, ajustar un modelo de la forma $p_j(x) = P[Y = Y_j | X = x] = f_j(x) \quad \forall j = 1, \dots, k$ para cada vector x de valores observados de las variables explicativas X .

En el caso de una variable de respuesta binaria, su distribución condicionada a cada combinación de valores observados de las covariables sigue una Bernoulli. Cuando la variable de respuesta es politémica, la distribución de Bernoulli se convierte en una distribución multinomial de parámetros las probabilidades de cada una de las categorías de respuesta. Es decir, $(Y/X=x) \rightarrow M(1; p_1(x), \dots, p_k(x))$, siendo $\sum_{j=1}^k p_j(x) = 1$

El modelo lineal para cada una de las transformaciones logit generalizadas, para n variables explicativas, es de la siguiente forma:

$$L_j(x) = \sum_{s=0}^n b_{sj} x_s = x' b_j \quad \forall j = 1, \dots, k-1$$

Para cada vector de valores observados de las variables explicativas $x = (x_0, x_1, x_2, \dots, x_n)'$ con $x_0 = 1$ y $b_j = (b_{0j}, b_{1j}, \dots, b_{nj})'$ el vector de parámetros asociado a la categoría Y .

Para las probabilidades de respuesta, podemos escribir el modelo de la siguiente forma:

$$p_j(x) = \frac{\exp(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_s)}{1 + \sum_{j=1}^{k-1} \exp(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_s)} \quad \forall j = 1, \dots, k-1$$

$$p_k(x) = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^{k-1} \exp(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_s)}$$

2.2. Interpretación de los modelos

A continuación, se muestra la interpretación de los parámetros del modelo en función del tipo de variables.

Una variable predictora cuantitativa X

Si en el modelo tenemos sólo una única covariable cuantitativa X, el modelo para cada valor observado x de la variable X viene dado por:

$$L_j(x) = a_j + b_j x, \quad \forall j = 1, \dots, k-1$$

A continuación, se muestra la exponencial de los parámetros b_j asociados a cada categoría de la variable dependiente, que se interpreta en términos de cocientes de ventajas (odds ratio):

$$\theta_j(\Delta X = 1) = \frac{\frac{p_j(x+1)}{p_k(x+1)}}{\frac{p_j(x)}{p_k(x)}} = \frac{\exp(a_j + b_j(x+1))}{\exp(a_j + b_j x)} = \exp(b_j) \quad \forall j = 1, \dots, k-1$$

$\theta_j(\Delta X = 1)$ es el cociente de ventajas de respuesta Y_j frente a la última categoría Y_k cuando aumenta en una unidad la variable X.

Más de una variable predictora cuantitativa

Para el modelo logit generalizado múltiple, los cocientes de ventajas se definen incrementando una de las variables y controlando fijas las demás.

$$\theta_j(\Delta X_r = 1 / X_s = x_s, s \neq r) = \frac{\frac{P[Y=Y_j / X_r=x_r+1, X_s=x_s, s \neq r]}{P[Y=Y_k / X_r=x_r+1, X_s=x_s, s \neq r]}}{\frac{P[Y=Y_j / X_r=x_r, X_s=x_s, s \neq r]}{P[Y=Y_k / X_r=x_r, X_s=x_s, s \neq r]}} = \exp(b_{rj}) \quad \forall j = 1, \dots, k-1$$

Siendo $\theta_j(\Delta X_r = 1 / X_s = x_s, s \neq r)$ el cociente de ventajas de respuesta Y_j frente a la última categoría, Y_k cuando aumenta en una unidad la variable X_r y las demás se controlan fijas.

Variables predictoras categóricas

Si se incluyen en el modelo variables independientes categóricas, se introducen mediante sus variables del diseño asociadas (variables dummies). Supongamos que tenemos la variable categórica A con categorías $A_1, \dots, A_p$. Si de esta variable realizamos la transformación a variables de diseño mediante el método parcial que asigna un uno a la variable asociada a cada categoría y un cero al resto, y tomando como categoría de referencia la primera, obtenemos p-1 variables que las denotamos como $X_m^A (m=2, \dots, p)$.

Así que el modelo de regresión logística multinomial generalizado que obtenemos sigue siendo un modelo lineal, como en los casos anteriores, para cada logit generalizado en función de esas variables de diseño procedentes de la variable A y viene dado por:

$$L_{j/l} = \ln \left[\frac{p_{j/l}}{p_{k/l}} \right] = b_{0j} + \sum_{m=2}^p \tau_{lm}^A X_{lm}^A \quad l = 1, \dots, p; j = 1, \dots, k-1$$

siendo $p_{j/l} = P \left[Y = \frac{Y_j}{A} = A_l \right]$, la probabilidad de respuesta Y_j en la categoría A_l .

2.3. Métodos de estimación

Para la estimación de los coeficientes del modelo y de sus errores estándar, se utiliza la estimación por máxima verosimilitud, es decir, estimaciones que hagan máxima la probabilidad de obtener los valores de la variable dependiente y proporcionados por los datos de la muestra. Al contrario de lo que ocurre con la estimación de los coeficientes de regresión lineal múltiple que se utiliza el método de los mínimos cuadrados, los cálculos para las estimaciones de los coeficientes de la regresión logística multinomial no son directos, hay que llevar a cabo métodos iterativos, como el método de Newton–Raphson.

Al aplicar estos métodos además de obtener las estimaciones de los coeficientes de regresión, se obtienen sus errores estándar y las covarianzas entre las covariables del modelo.

A continuación, describimos el método de estimación de máxima verosimilitud para el cálculo de los coeficientes de nuestro modelo de regresión logística multinomial.

Supongamos que disponemos de una muestra aleatoria de tamaño N con Q combinaciones diferentes de valores de las variables explicativas $X_1, \dots, X_n$. Denotemos a cada combinación de valores de las variables explicativas por $x_q = (x_{q0}, x_{q1}, \dots, x_{qn})'$ con $x_{q0} = 1 \forall q = 1, \dots, Q$. En cada una de estas combinaciones se tiene una muestra aleatoria de d_q observaciones independientes de la variable de respuesta poltómica Y , de entre las cuales denotamos por $y_{j/q}$ al número de observaciones que caen en la categoría de respuesta $Y_j \forall j = 1, \dots, k$.

Así que, se verifica que $\sum_{j=1}^k y_{j/q} = d_q$ y $\sum_{q=1}^Q d_q = N$

Los vectores $\left(y_{1/q}, \dots, y_{k/q} \right)' \forall q = 1, \dots, Q$ siguen una distribución de probabilidad multinomiales independientes, $M(d_q; p_{1/q}, \dots, p_{k/q})$, siendo $p_{j/q} = P[Y = Y_j / X = x_q]$ y verificando que $\sum_{j=1}^k p_{j/q} = 1$.

Por tanto, la función de verosimilitud de los datos viene dada por:

$$V = \prod_{q=1}^Q \left(\frac{d_q!}{\prod_{j=1}^k (y_{j/q})!} \prod_{j=1}^k p_{j/q}^{y_{j/q}} \right)$$

Así que el núcleo de la log-verosimilitud es: $K = \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^k y_{j/q} \ln(p_{j/q})$

Teniendo en cuenta la ecuación del modelo logit generalizado multinomial y sustituyendo en la expresión anterior, obtenemos la siguiente expresión del núcleo de la logverosimilitud:

$$K = \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^k y_{j/q} \left(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_{qs} \right) - \sum_{q=1}^Q \left(\sum_{j=1}^k y_{j/q} \right) \ln \left(\sum_{j=1}^k \exp \left(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_{qs} \right) \right) = \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^k y_{j/q} \left(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_{qs} \right) - \sum_{q=1}^Q n_q \ln \left(\sum_{j=1}^k \exp \left(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_{qs} \right) \right)$$

Derivando respecto de los parámetros:

$$\frac{\Delta K}{b_{sj}} = \sum_{q=1}^Q y_{jq} x_{qs} - \sum_{q=1}^Q n_q x_{qs} \frac{\exp(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_{qs})}{\sum_{j=1}^k \exp(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_{qs})}$$

Así, obtenemos las ecuaciones de verosimilitud con forma matricial:

$$X'_{((n+1) \times Q)} Y_{j(Q \times 1)} = X'_{((n+1) \times Q)} \hat{m}_{j(Q \times 1)} \quad \forall j = 1, \dots, k-1$$

siendo $y_j = (y_{j/1}, \dots, y_{j/Q})'$ y $\hat{m}_j = (\hat{m}_{j/1}, \dots, \hat{m}_{j/Q})'$ con $\hat{m}_{j/Q}$ la frecuencia esperada de respuesta Y_j en la combinación x_q de valores observados de las variables predictoras, estimada bajo el modelo y definida como $\hat{m}_{j/Q} = d_q \hat{p}_{j/q}$.

Para obtener los estimadores de máxima verosimilitud hay que resolver $k-1$ sistemas de $n+1$ ecuaciones no lineales. Así que para resolverlo utilizamos el método iterativo de Newton-Raphson. Con este método obtenemos el estimador de los parámetros $\hat{b}$, que es una matriz de dimensión $(n+1) \times (k-1)$ formado por las siguientes columnas: $\hat{b} = (\hat{b}'_1, \hat{b}'_2, \dots, \hat{b}'_{k-1})'$ siendo $\hat{b}'_j$ el estimador de máxima verosimilitud del vector de parámetros asociado a la categoría de la variable respuesta Y_j . A continuación, obtendremos la matriz de covarianzas de $\hat{b}$, que es la inversa de la matriz de información de Fisher.

$$Cov(\hat{b}_j, \hat{b}_i) = \left[-E \left(\frac{\Delta^2 K}{\Delta b_{ri} \Delta b_{sj}} \right) \right]^{-1} = \left[-X' \text{Diag} \left[d_q p_{\frac{j}{q}} p_{\frac{i}{q}} \right] X \right]^{-1}$$

$$Cov(\hat{b}) = \begin{pmatrix} Cov(\hat{b}_1) & Cov(\hat{b}_1, \hat{b}_2) & \dots & Cov(\hat{b}_1, \hat{b}_{k-1}) \\ Cov(\hat{b}_1, \hat{b}_2) & Cov(\hat{b}_2) & \dots & Cov(\hat{b}_2, \hat{b}_{k-1}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Cov(\hat{b}_1, \hat{b}_{k-1}) & Cov(\hat{b}_2, \hat{b}_{k-1}) & \dots & Cov(\hat{b}_{k-1}) \end{pmatrix}$$

2.4. Bondad del ajuste del modelo

Uno de los primeros indicadores de importancia para apreciar el ajuste del modelo logístico multinomial es el doble logaritmo del estadístico de verosimilitud. Sea $y_{j/q}$ el número de observaciones que caen en la categoría de respuesta $Y_j \quad \forall j = 1, \dots, k$ y sean las d_q observaciones correspondientes a la q -ésima combinación de valores de las variables explicativas. Denotamos por $\hat{m}_{j/q}$ la frecuencia esperada de respuesta Y_j en la combinación x_q de valores observados de las variables predictoras, estimada bajo el modelo y definida como $\hat{m}_{j/q} = d_q \hat{p}_{j/q}$.

Así que para contrastar la bondad del ajuste global del modelo cuando el número de observaciones en cada combinación de valores de las variables explicativas es grande se utiliza el estadístico chi-cuadrado de Pearson y el estadístico de Wilks de razón de verosimilitudes. El test global de bondad de ajuste del modelo de regresión logística multinomial múltiple contrasta el siguiente contraste de hipótesis:

$$H_0: p_{j/q} = \frac{\exp(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_{qs})}{1 + \exp(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_{qs})} \quad \forall q = 1, \dots, Q; \quad \forall j = 1, \dots, k$$

$$H_1: p_{j/q} \neq \frac{\exp(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_{qs})}{1 + \exp(\sum_{s=0}^n b_{sj} x_{qs})} \quad \text{para algún } q \text{ y } j$$

Test chi-cuadrado de Pearson

El estadístico chi-cuadrado de Pearson de bondad de ajuste a un modelo de regresión logística multinomial, M de la forma anterior viene dado por:

$$X^2(M) = \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^k \frac{(y_{j/q} - d_q \hat{p}_{j/q})^2}{d_q \hat{p}_{j/q}}$$

siendo $\hat{p}_{j/q}$ la estimación por máxima verosimilitud de $p_{j/q}$.

Este estadístico tiene distribución asintótica chi-cuadrado con grados de libertad obtenidos como la diferencia entre el número de parámetros $p_{j/q}$ y el número de parámetros independientes en el modelo, $Q-(n+1)x(k-1)$. Es decir, $X^2(M) \xrightarrow{d} \chi^2_{Q-(n+1)x(k-1)}$, si $d_q \rightarrow \infty$. Así que se rechaza la hipótesis nula con un nivel de significación α cuando $X^2(M)_{obs} \geq \chi^2_{Q-(n+1)x(k-1);\alpha}$ o equivalentemente podemos definir el p-valor del contraste como la probabilidad acumulada a la derecha del valor observado: p-valor $P[X^2(M) \geq X^2(M)_{obs}]$, se rechaza la hipótesis nula cuando p-valor $\leq \alpha$.

Test chi-cuadrado de razón de verosimilitudes. Estadístico de Wilks. Devianza

El estadístico de Wilks de razón de verosimilitudes para el contraste de bondad de ajuste del modelo de regresión logística multinomial M se obtiene como menos dos veces el logaritmo del cociente entre el supremo de la verosimilitud bajo la hipótesis nula y el supremo de la verosimilitud en la población. A partir de esta expresión operando se obtiene la expresión de este estadístico que viene dada por:

$$G^2(M) = 2 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^k y_{j/q} \ln \left(\frac{y_{j/q}}{\hat{m}_{j/q}} \right) \right]$$

Este estadístico tiene distribución asintótica chi-cuadrado con grados de libertad la diferencia entre la dimensión del espacio paramétrico y la dimensión de este espacio bajo la hipótesis nula. Para un modelo de regresión logística multinomial los grados de libertad es la diferencia entre el número de parámetros $p_{j/q}$ y el número de parámetros b_{sj} bajo el modelo, es decir, $Q-(n+1)x(k-1)$ grados de libertad $G^2(M) \xrightarrow{d} \chi^2_{Q-(n+1)x(k-1)}$, si $d_q \rightarrow \infty$. Así que se rechaza la hipótesis nula con un nivel de significación α cuando $G^2(M)_{obs} \geq \chi^2_{Q-(n+1)x(k-1);\alpha}$ o equivalentemente cuando p-valor $= P[G^2(M) \geq G^2(M)_{obs}] \leq \alpha$.

Además de los contrastes que hemos visto anteriormente, podemos calcular otras medidas que nos dan información sobre la calidad del modelo, al igual que en la regresión lineal que se utiliza la medida de R^2 . En los modelos de regresión logística binaria, la calidad del ajuste se mide mediante coeficientes de determinación conocidos como Pseudo- R^2 , para la regresión logística multinomial también se utilizan estos coeficientes. De entre todos los que existen, los más usados son el de Mc-Fadden, el de Cox-Snell y el de Nagelkerke.

2.5. Contrastes sobre los parámetros del modelo

Además de construir el modelo y ajustarlo y habiendo obtenido las estimaciones, el siguiente paso será comprobar la significación estadística de cada uno de los coeficientes de regresión en el modelo. Para ello se pueden emplear básicamente dos métodos para los modelos de regresión logística: el estadístico de Wald y el estadístico condicional de razón de verosimilitud. Así que nos planteamos contrastar si un subconjunto de los parámetros del modelo de regresión logística multinomial, que denotaremos por $b = (b_1, \dots, b_r)'$, es nulo. Así que nos planteamos el contraste de hipótesis:

$$H_0: b = 0$$

$$H_1: b \neq 0$$

Contrastes de Wald

Se basan en la normalidad asintótica de los estimadores de máxima verosimilitud. El estimador de máxima verosimilitud de b , $\hat{b}$, tiene distribución normal asintótica de media b y matriz de covarianzas estimada $\widehat{Cov}(\hat{b})$ obtenida a partir de la matriz de covarianza $Cov(\hat{b})$. Así que el estadístico de Wald presenta la forma cuadrática: $\hat{b}'[\widehat{Cov}(\hat{b})]^{-1}\hat{b}$, que tiene distribución chi-cuadrado asintótica con r grados de libertad (número de parámetros nulos bajo la hipótesis nula). Así que se rechaza la hipótesis nula al nivel de significación α cuando el valor observado de este estadístico sea mayor o igual que el cuantil de orden $(1 - \alpha)$ de la distribución χ_r^2 . Su valor para un coeficiente concreto viene dado por el cociente entre el valor del coeficiente y su correspondiente error estándar. Es decir si se quiere contrastar:

$$H_0: b_{sj} = 0$$

$$H_1: b_{sj} \neq 0$$

El estadístico será: $W = \frac{\hat{b}_{sj}^2}{\hat{\sigma}(\hat{b}_{sj})}$, que tiene distribución chi-cuadrado asintótica con un grado de libertad. Así que se rechaza la hipótesis nula con nivel de confianza $1-\alpha$ si $W_{obs} \geq \chi_{1;\alpha}^2$.

Contrastes condicionales de razón de verosimilitud

Se trata de ir contrastando cada modelo que surge de eliminar de forma aislada cada una de las covariables frente al modelo completo. La ausencia de significación implica que el modelo sin la covariable no empeora respecto al modelo completo (es decir, da igual su presencia o su ausencia), por lo que según la estrategia de obtención del modelo más reducido (principio de parsimonia), dicha covariable debe ser eliminada del modelo ya que no aporta nada al mismo. Supongamos que tenemos un modelo de regresión logística multinomial M_G que se ajusta bien y se desea contrastar si un subconjunto de parámetros, $b = (b_1, \dots, b_r)$, son nulos. Sea M_P el modelo con ese subconjunto de parámetros ceros. Así que M_P está anidado en el modelo genral M_G . Así que planteamos el contraste:

$$H_0: b = 0 \text{ (} M_P \text{ se verifica)}$$

$$H_1: b \neq 0 \text{ (asumiendo cierto } M_G \text{)}$$

Si asumimos que M_G se verifica, el estadístico del test de razón de verosimilitudes para contrastar si M_P se verifica es: $G^2(M_P|M_G) = -2(L_P - L_G) = G^2(M_P) - G^2(M_G)$, siendo L_P y L_G los máximos de la log-verosimilitud bajo la suposición de que se verifican los modelos saturados, M_P y M_G , respectivamente. Es decir, el test de razón de verosimilitud para contrastar dos modelos anidados es la diferencia de los contrastes de razón de verosimilitudes de bondad de ajuste para cada modelo. El estadístico $G^2(M_P|M_G)$ tiene distribución chi-cuadrado con grados de libertad la diferencia entre los grados de libertad de las distribuciones chi-cuadrado asintóticas de $G^2(M_P)$ y $G^2(M_G)$, es decir, el número de parámetros que se anulan para H_0 , r . Así que se rechaza la hipótesis nula al nivel de significación α cuando $G_{obs}^2(M_P|M_G) \geq \chi_{r;\alpha}^2$.

2.6. Métodos de selección de los modelos

Una vez conocido el procedimiento de ajuste de modelos de regresión logística, el siguiente paso es el desarrollo de estrategias para seleccionar las variables que mejor explican a la variable de respuesta. Para ello se adoptará el principio de parsimonia que consiste en seleccionar el modelo que con menor número de parámetros se ajuste bien a los datos y lleve a una interpretación sencilla en términos de cocientes de ventajas. A continuación se describen diferentes métodos para llegar a ajustar un modelo.

Hacia adelante

- 1) Se inicia con un modelo vacío (sólo la constante).
- 2) Se ajusta un modelo y se calcula el p-valor del contraste de razón de verosimilitud que resulta de incluir cada variable por separado.
- 3) Se selecciona el modelo con el p-valor más significativo.
- 4) Se ajusta de nuevo un modelo con la(s) variable(s) seleccionada(s) y se calcula el p-valor de añadir cada variable no seleccionada anteriormente por separado.
- 5) Se selecciona el modelo con el más significativo.
- 6) Se repite 4 – 5 hasta que no queden variables significativas para incluir.

Hacia atrás

- 1) Se inicia con un modelo con todas las variables candidatas.
- 2) Se eliminan, una a una, cada variable y se calcula la pérdida de ajuste al eliminar.
- 3) Se selecciona para eliminar la menos significativa.
- 4) Se repite 2 – 3 hasta que todas las variables incluidas sean significativas y no pueda eliminarse ninguna sin que se pierda ajuste.

Stepwise

En este método se combinan los métodos adelante y atrás. Puede empezarse por el modelo vacío o por el completo, pero en cada paso se exploran las variables incluidas, por si deben salir y las no seleccionadas, por si deben entrar. Pero no todos los métodos llegan a la misma solución necesariamente. El método de stepwise, está basado en contrastes condicionales de razón de verosimilitudes. Si partimos del modelo vacío, sólo con la constante, este método consiste en partir de ese modelo inicial, y en cada paso se ajustarán todos aquellos modelos que resultan de incluir cada una de las variables explicativas que no están en el modelo seleccionado en el paso anterior. Entonces se llevan a cabo contrastes condicionales de razón de verosimilitudes que tienen en la hipótesis nula el modelo seleccionado en el paso anterior y en la hipótesis alternativa el modelo resultante de la inclusión de cada variable. De este modo se seleccionarán las variables para las que el contraste sea significativo, y se incluiría en el modelo aquella variable asociada al mínimo pvalor de entre todos los menores o iguales que α . La inclusión de variables mediante este método continúa hasta que ninguno de estos contrastes condicionales sea significativo.

2.7. Validación de los modelos

Una vez utilizado el Test de chi-cuadrado de Pearson X^2 , o el test de chi-cuadrado de razón de verosimilitudes G^2 , se debe estudiar la bondad del ajuste de cada observación, para comprobar si una observación es influyente o no. Para ello una de las técnicas para estudiar esta cuestión es el estudio de los residuos que comparan el número observado de éxitos, en cada combinación de valores de las variables predictoras, con su valor ajustado por el modelo. Veamos a continuación los tipos de residuos más habituales basándose en los estadísticos X^2 y G^2 , que se definen en cada combinación de valores x_j de las variables explicativas.

Residuos de Pearson o residuos estandarizados

Vienen dado por la siguiente expresión: $r_{j/q} = \frac{y_{j/q} - d_q \hat{p}_{j/q}}{[d_q \hat{p}_{j/q}]^{\frac{1}{2}}}$

Con esta expresión, podemos definir el estadístico chi-cuadrado de Pearson como:

$$X^2 = \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^k r_{j/q}^2$$

Para contrastar la significación estadística de los residuos planteamos el contraste:

$$H_0: r_{j/q} = 0$$

$$H_1: r_{j/q} \neq 0$$

Bajo la hipótesis nula $r_{j/q}$ tiene una distribución asintótica normal con media cero y varianza estimada $\hat{\sigma}^2(r_{j/q}) < 1$, es decir, que los residuos tienen menor variabilidad que una variable aleatoria estándar, pero suelen ser tratados como normales estándar, considerándose significativos cuando sus valores absolutos son mayores que dos (falta de ajuste). Para evitar este problema se definen los residuos de Pearson ajustados que presentan distribuciones asintóticas normales estándar y vienen dados por:

$$r_{j/q}^s = \frac{r_q}{\hat{\sigma}(r_{j/q})}$$

También se puede tomar el cuadrado de r_q^s que tiene distribución chi-cuadrado con un grado de libertad. Así que se rechaza la hipótesis nula con un nivel de significación α cuando $|r_{j/q}^s| \geq z_{\alpha/2}$.

Residuos de la devianza o residuos estudentizados

Se definen como:

$$d_{j/q} = \left(2 \left[y_{j/q} \ln \frac{y_{j/q}}{\hat{m}_{j/q}} \right] \right)^{\frac{1}{2}}$$

Con esta expresión podemos definir el estadístico de chi-cuadrado de razón de verosimilitudes como: $G^2 = \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^k d_{j/q}^2$. Igual que en el caso anterior, bajo la hipótesis nula $H_0: d_{j/q} = 0$ el residuo $d_{j/q}$ tiene distribución asintóticamente normal con media 0 y varianza estimada $\hat{\sigma}^2(d_{j/q}) < 1$. En este caso, se consideran significativos cuando el valor absoluto es mayor que 4, y se considera que la observación correspondiente es anormal. Al igual que antes, se definen los residuos de la devianza ajustados o estandarizados:

$$d_{j/q}^s = \frac{d_q}{\hat{\sigma}(d_{j/q})}$$

que tiene distribución asintótica normal estándar. Así que rechazamos la hipótesis nula con un nivel de significación α cuando $|d_{j/q}^s| \geq z_{\alpha/2}$.

Los resultados y conclusiones de este análisis están recogidas en los bloques V y VI del presente documento.

BLOQUE IV: PUBLICACIONES

A continuación, se exponen las tres publicaciones consecutivas que se han realizado a medida que se han ido obteniendo resultados y que tienen como título lo siguiente:

IV.1. Paper A: Investigating the risk factors associated with the severity of the pedestrians injured on Spanish crosstown roads

IV.2. Paper B: Population ageing and rural road accidents: Analysis of accident severity in traffic crashes with older pedestrians on Spanish crosstown roads

IV.3. Paper C: Analysis of the risk factors affecting the severity of traffic accidents on Spanish crosstown roads: The driver's perspective