

UNIVERSIDAD DE GRANADA

E.T.S. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Departamento de Ingeniería Civil



PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL (B23.56.1)

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE INVERSIÓN EN CARRETERAS Y SEGURIDAD VIAL

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN ROAD INVESTMENT AND TRAFFIC SAFETY

Para la obtención del

GRADO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE GRANADA CON MENCIÓN
DE DOCTORADO INTERNACIONAL

AUTOR:

JOSÉ ANTONIO NAVARRO MORENO

DIRECTOR:

FRANCISCO JAVIER CALVO POYO

Granada, 2024

UNIVERSIDAD DE GRANADA

E.T.S. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Departamento de Ingeniería Civil



TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE INVERSIÓN EN CARRETERAS Y SEGURIDAD VIAL

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN ROAD INVESTMENT AND TRAFFIC SAFETY

AUTOR:

JOSÉ ANTONIO NAVARRO MORENO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

DIRECTOR:

FRANCISCO JAVIER CALVO POYO

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Granada, 2024

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: José Antonio Navarro Moreno
ISBN: 978-84-1195-684-0
URI: <https://hdl.handle.net/10481/102485>

AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar estos agradecimientos dedicándole unas palabras de gratitud a mi director de Tesis, Francisco Javier Calvo Poyo, por haber mostrado una tremenda paciencia, dedicación y apoyo continuo a lo largo de este difícil camino. Muchas gracias por darme esta oportunidad y guiarme durante todas las etapas de la investigación.

También me gustaría extender esta gratitud a Juan de Oña por el gran apoyo prestado y consejos ofrecidos, así como al resto de compañeras del grupo de investigación TRYSE con los que he compartido vivencias estos años: Laura, Rocío y Tasneem.

Gracias al profesor Alfonso Montella por acogerme durante mi estancia de investigación en la Universidad de Nápoles Federico II y al resto del equipo (Francesco, Filomena, María y Antonella) por recibirme con los brazos abiertos.

Al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, así como la Agencia Estatal de Investigación, por la financiación recibida a través del proyecto RTI2018-101770-B-I00, dentro del Programa Estatal de I+D+i Orientado a los Retos de la Sociedad. Además, muchas gracias al resto de organismos que amablemente me han facilitado datos para llevar a cabo este trabajo: Dirección General de Tráfico, Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, Asociación Española de la Carretera e International Transport Forum.

Y, por supuesto, quiero agradecer a mis hermanos por estar siempre ahí. A Ginebra, por la ayuda con la *traducció*. Al resto de mi familia, amigos y monstruos que me han estado apoyando en los momentos difíciles.

A todos, muchas gracias.

RESUMEN

El transporte por carretera ocupa un lugar predominante como medio de transporte en la mayoría de países del mundo. Por ello, desde el punto de vista de la planificación de las inversiones de la infraestructura carretera, la dotación de recursos económicos para la creación de nuevas carreteras o para el mantenimiento de las mismas pretende mejorar las condiciones del sistema viario. Así, estas inversiones van a provocar una modificación en la infraestructura existente (aumento, modificación o mejora de la misma). Por tanto, considerando que la infraestructura (junto con los usuarios de la vía, el entorno y el vehículo), es uno de los principales factores influyentes en la ocurrencia de accidentes, resulta de vital importancia indagar sobre la posible relación entre las inversiones efectuadas en carreteras y la seguridad vial.

El tema de estudio propuesto, a pesar de tener implicaciones para diversos ámbitos, desde la planificación presupuestaria a la salud pública, ha sido poco tratado en la literatura. Es un tema complejo y en el que los análisis requeridos, a nivel macro, no pueden tener en cuenta todos los factores influyentes en la seguridad vial. Existen estudios que han incluido variables como la inversión en construcción y el gasto en mantenimiento como posibles factores explicativos dentro de sus modelos. Sin embargo, estos estudios cuentan además con una serie de limitaciones que dificultan su comparabilidad, por ejemplo: inapropiada desagregación de las cifras de siniestralidad e inversión, ausencia de medida de la exposición al riesgo o la limitación del ámbito de estudio a un país en concreto. De esta forma, no se ha podido extraer una conclusión general sobre la influencia de las inversiones en carreteras sobre la seguridad vial.

Por ello, el objetivo principal de esta Tesis Doctoral consiste en analizar la influencia de los recursos económicos dedicados a las carreteras sobre diversos indicadores de exposición al riesgo de la seguridad vial, abarcando dos ámbitos de estudio: Europa y España. Para alcanzar este objetivo, la Tesis se ha estructurado en torno a tres casos de estudio. Por una parte, los casos n.º 1 y n.º 2 plantean modelos econométricos lineales, para datos de panel, con información de 23 países europeos (desagregación NUTS-0) con los que se pretende evaluar la existencia de una influencia general, a nivel macro, de las inversiones sobre las cifras de accidentes con heridos y fallecidos en carretera. Y, por otro lado, el caso n.º 3 plantea modelos econométricos para datos de recuento, también en forma de panel con información de 43 provincias españolas (NUTS-3). En este último caso, se pretender indagar en la influencia específica sobre la siniestralidad de los motociclistas.

Como resultados destacables, se ha encontrado que el gasto efectuado en mantenimiento de carreteras muestra un efecto beneficioso sobre la seguridad vial en todos los modelos econométricos planteados. Por otro lado, la inversión destinada a la construcción de nuevas carreteras muestra un efecto variado sobre la seguridad vial, en función del nivel de desarrollo socioeconómico del ámbito considerado: beneficioso en contextos de menor desarrollo socioeconómico y perjudicial en el caso contrario. Por último, la dotación de recursos económicos a las carreteras, sea para construcción o mantenimiento, se vincula con una reducción de la siniestralidad de los motociclistas.

ABSTRACT

Road transport occupies a predominant place as a means of transportation in most countries. Therefore, from the point of view of road infrastructure investment planning, the allocation of economic resources for the construction of new roads or the maintenance of existing ones is intended to improve the conditions of the road system. Thus, these investments will cause a modification in the existing infrastructure (increase, modification, or improvement of it). Hence, considering that the infrastructure—together with road users, the environment, and the vehicle—is one of the main factors influencing the occurrence of crashes, it is vital to investigate the possible relationship between road investments and traffic safety.

Despite having implications for various areas, from budget planning to public health, the research topic addressed has been little covered in the literature. It is a complex subject and the required macro-level analyses cannot consider all the factors influencing road safety. Some studies have included variables such as construction investment and maintenance expenditure as possible explanatory factors in their models. However, these studies also have a series of limitations that hinder their comparability, for example, inappropriate disaggregation of crashes and investment figures, absence of a measure of risk exposure or the limitation of the scope of the study to a specific country. Thus, it has not been possible to draw a general conclusion on the influence of road investments on traffic safety.

The main objective of this Doctoral Thesis is to analyze the influence of the economic resources allocated to roads on various indicators of road safety risk, covering two study areas: Europe and Spain. The Thesis has been structured around three case studies to achieve this objective. On the one hand, cases no. 1 and no. 2 propose linear econometric models for panel data, with information from 23 European countries (NUTS-0 disaggregation) with which the aim is to evaluate the existence of a general influence, at the macro level, of investments on the figures of crashes with injuries and fatalities on the road. On the other hand, case no. 3 proposes econometric models for panel count data with information from 43 Spanish provinces (NUTS-3). In the latter case, the aim is to investigate the specific influence on motorcyclist crash rate.

Notable results include the finding that spending on road maintenance has a beneficial effect on road safety in all the econometric models considered. On the other hand, investment in the construction of new roads has a varied effect on traffic safety, depending on the area's socio-economic development level: it is beneficial in the context of lower socioeconomic development and detrimental in the opposite case. Finally, allocating monetary resources to roads, whether for construction or maintenance, is associated with reducing motorcyclist crash rate.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
LISTADO DE ACRÓNIMOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS	XI
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	6
1.3 PRINCIPALES APORTACIONES.....	7
2 ESTADO DEL ARTE	11
2.1 ESTUDIOS DE ÁMBITO INTERNACIONAL.....	11
2.2 ESTUDIOS DE ÁMBITO NACIONAL.....	21
2.3 ESTUDIOS DE SEGURIDAD VIAL PARA V2RM.....	36
2.4 CONCLUSIONES SOBRE EL ESTADO DEL ARTE	45
3 OBJETIVOS	49
3.1 OBJETIVO PRINCIPAL	49
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	50
3.3 HIPÓTESIS	50
4 MATERIALES Y METODOLOGÍA	55
4.1 MATERIALES	56
4.1.1 <i>Datos para los casos de estudio n.º 1 y n.º 2</i>	56
4.1.1.1 Datos para las variables dependientes.....	57
4.1.1.2 Datos para las variables independientes.....	58
4.1.2 <i>Datos para el caso de estudio n.º 3</i>	62
4.1.2.1 Datos para la variable dependiente	62
4.1.2.2 Datos para las variables independientes.....	63
4.2 METODOLOGÍA.....	69
4.2.1 <i>CASO DE ESTUDIO N.º 1: Análisis a nivel europeo</i>	70
4.2.1.1 El contexto europeo	70
4.2.1.2 Selección de variables	76
4.2.1.3 Modelos de regresión lineal.....	79
4.2.1.4 Errores estándar corregidos por panel (PCSE)	80
4.2.1.5 Estimador de Prais-Winsten y estacionariedad de las series temporales	82
4.2.1.6 Modelo de siniestralidad a nivel europeo.....	83
4.2.2 <i>CASO DE ESTUDIO N.º 2: Análisis a nivel europeo según la riqueza de cada país</i>	84
4.2.2.1 Definición de los grupos de países y descripción de los datos	84
4.2.2.2 Método de Parks-Kmenta (MCGF-Parks)	89
4.2.2.3 Errores estándar tipo Driscoll-Kraay	90
4.2.2.4 Modelo a nivel europeo según riqueza de países	92

ÍNDICE GENERAL

4.2.3	CASO DE ESTUDIO N.º 3. Análisis de siniestralidad vial de motocicletas en España	94
4.2.3.1	El contexto español	94
4.2.3.2	Selección de variables	99
4.2.3.3	Modelos de datos de recuento	105
4.2.3.4	Modelo de regresión binomial negativa con parámetros fijos (BNPF)	106
4.2.3.5	Modelos de regresión binomial negativa con parámetros aleatorios (BNPA)	107
4.2.3.6	Modelo de siniestralidad de motocicletas en España	110
4.2.3.7	Selección de modelo	110
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	115
5.1	CASO DE ESTUDIO N.º 1: ANÁLISIS DE SINIESTRALIDAD VIAL A NIVEL EUROPEO	115
5.1.1	Discusión de resultados	119
5.2	CASO DE ESTUDIO N.º 2: ANÁLISIS DE LA MORTALIDAD VIAL A NIVEL EUROPEO, DIFERENCIANDO SEGÚN EL NIVEL DE INGRESOS DE CADA PAÍS	123
5.2.1	Resultados del grupo de Países de Rentas Altas	124
5.2.2	Resultados del grupo de Países de Rentas Bajas	127
5.2.3	Discusión de resultados	129
5.3	CASO DE ESTUDIO N.º 3: ANÁLISIS DE SINIESTRALIDAD VIAL DE MOTOCICLETAS EN ESPAÑA 136	
5.3.1	Discusión de resultados	144
6	CONCLUSIONES	153
6.	CONCLUSIONS	159
7.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	165
8.	REFERENCIAS	171

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. RESUMEN DE ESTUDIOS INTERNACIONALES	16
TABLA 2. RESUMEN DE ESTUDIOS NACIONALES QUE CONSIDERAN LOS RECURSOS ECONÓMICOS DESTINADOS A LAS CARRETERAS	32
TABLA 3. RESUMEN DE ESTUDIOS SOBRE V2RM QUE CONSIDERAN MEDIDAS DE EXPOSICIÓN AL RIESGO ESPECÍFICAS PARA EL TRÁFICO O DISTANCIA RECORRIDA.	42
TABLA 4. DATOS RECOPIADOS A NIVEL EUROPEO	61
TABLA 5. DATOS A NIVEL NACIONAL (PROVINCIAS ESPAÑOLAS), JUNTO CON SUS DEFINICIONES Y FUENTES DE PROCEDENCIA.	67
TABLA 6. COMPARACIÓN DE TRÁFICO, INVERSIÓN Y ACCIDENTES ENTRE EL AÑO 1998 Y 2016.....	76
TABLA 7. DEFINICIÓN DE VARIABLES Y ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS	79
TABLA 8. RESUMEN DE LOS TEST PLANTEADOS	80
TABLA 9. DISTRIBUCIÓN DE PAÍSES SEGÚN GRUPOS DE RIQUEZA.....	85
TABLA 10. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LAS VARIABLES SEGÚN CLASIFICACIÓN DE LOS PAÍSES.	85
TABLA 11. TEST DE HOMOCEDASTICIDAD, CORRELACIÓN SERIAL Y DEPENDENCIA DE CORTE TRANSVERSAL.	88
TABLA 12. DEFINICIÓN Y FUENTES DE LAS VARIABLES SELECCIONADAS PARA EXPLICAR LOS ACCIDENTES DE MOTOS.	101
TABLA 13. PRINCIPALES ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LAS VARIABLES.	102
TABLA 14. DENOMINACIÓN DE LOS MODELOS PLANTEADOS Y ESPECIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS ALEATORIOS.	109
TABLA 15. RESULTADOS DE LOS MODELOS PLANTEADOS EN EL CASO DE ESTUDIO N.º 1.	116
TABLA 16. RESULTADOS DE LOS MODELOS PLANTEADOS EN EL CASO DE ESTUDIO N.º 2: PAÍSES DE RENTAS ALTAS.	124
TABLA 17. RESULTADOS DE LOS MODELOS PLANTEADOS EN EL CASO DE ESTUDIO N.º 2: PAÍSES DE RENTAS BAJAS.	127
TABLA 18. COMPARACIÓN DE MODELOS ESTIMADOS PARA PAÍSES DE RENTAS ALTAS Y BAJAS.	129
TABLA 19. RESULTADOS DE MODELOS PLANTEADOS PARA EL CASO DE ESTUDIO N.º 3: SELECCIÓN DE ESPECIFICACIÓN DE PARÁMETROS FIJOS O ALEATORIOS.	137
TABLA 20. ELEMENTOS DE LA MATRIZ TRIANGULAR INFERIOR Γ DEL MODELO (4).....	139
TABLA 21. RESULTADOS DEL MODELO SELECCIONADO PARA EL CASO DE ESTUDIO N.º 3: MODELO (5), BNPA-3.	140
TABLA 22. ELEMENTOS DE LA MATRIZ TRIANGULAR INFERIOR Γ DEL MODELO (5).	141
TABLA 23. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO (5).....	142

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO E HIPÓTESIS.	56
FIGURA 2. METODOLOGÍA DE ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS EUROPEA.	57
FIGURA 3. PAÍSES CON DATOS DE VÍCTIMAS MORTALES SEGÚN ÁMBITO URBANO E INTERURBANO.	58
FIGURA 4. PAÍSES CON DATOS DE ACCIDENTES CON HERIDOS Y MUERTOS.	59
FIGURA 5. PROVINCIAS CON DATOS DE EXPOSICIÓN AL RIESGO DE LAS MOTOCICLETAS.	63
FIGURA 6. RECURSOS ECONÓMICOS DEDICADOS A CARRETERAS SEGÚN ORGANISMO INVERSOR. AÑOS 2006, 2009 Y 2014.	64
FIGURA 7. ESQUEMA DEL PROCESO DE ESTIMACIÓN DE LOS DATOS DE INVERSIÓN EN CONSTRUCCIÓN POR PROVINCIAS.	65
FIGURA 8. ESQUEMA DEL PROCESO DE ESTIMACIÓN DE LOS DATOS DEL GASTO EN MANTENIMIENTO POR PROVINCIAS.	66
FIGURA 9. VARIACIÓN PORCENTUAL EN LAS CIFRAS DE FALLECIDOS ENTRE 2010 Y 2021, SEGÚN REGIONES GLOBALES.	70
FIGURA 10. NÚMERO DE VÍCTIMAS MORTALES DESDE EL AÑO 2000 HASTA 2020 EN LA UE27 (EN ESCALA LOGARÍTMICA). ..	72
FIGURA 11. INVERSIONES ANUALES EN CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, EN PORCENTAJE RELATIVO AL PIB, 1995-2016. ..	74
FIGURA 12. GASTO ANUAL EN MANTENIMIENTO DE CARRETERAS, EN PORCENTAJE RELATIVO AL PIB, 1995-2016.	75
FIGURA 13. DIAGRAMA CAUSAL SOBRE LA INFLUENCIA DE CAMBIOS SOCIOECONÓMICOS EN LA SEGURIDAD VIAL.	78
FIGURA 14. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS DE LAS VARIABLES CONSIDERADAS.	86
FIGURA 15. FALLECIDOS EN ACCIDENTE DE TRÁFICO EN ESPAÑA, 1960-2020.	95
FIGURA 17. EVOLUCIÓN DE LA SINIESTRALIDAD DE MOTOCICLETAS Y CICLOMOTORES EN ÁMBITO INTERURBANO, 2008-2020.	97
FIGURA 18. INVERSIÓN EN EQUIPO Y EN CONSTRUCCIÓN, 2005-2015.	97
FIGURA 19. EVOLUCIÓN DE LAS INVERSIONES REALIZADAS EN LA INFRAESTRUCTURA VIARIA ESPAÑOLA SEGÚN ORGANISMO INVERSOR, 2000-2019.	98
FIGURA 20. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS DE LAS VARIABLES, 2007-2015.	104
FIGURA 21. PARÁMETROS DE AUTOCORRELACIÓN DEL MODELO (6).	118
FIGURA 22 - ESQUEMA GENERAL DEL EFECTO MULTIPLICADOR DECRECIENTE DE LAS INVERSIONES EN INFRAESTRUCTURAS Y POSIBLE VÍNCULO CON BENEFICIOS EN SEGURIDAD VIAL DE LA INVERSIÓN EN CONSTRUCCIÓN.	131
FIGURA 23. EFECTOS FIJOS PROPIOS DE CADA PAÍS.	135
FIGURA 24. TENDENCIA LINEAL ESPECÍFICA DE CADA PAÍS.	136

LISTADO DE ACRÓNIMOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS

AEC	Asociación Española de la Carretera	
AR	<i>Autoregressive</i>	Proceso autorregresivo
BNPF	Modelo de regresión binomial negativa con parámetros fijos	
BNPA-1	Modelo de regresión binomial negativa con constante aleatoria	
BNPA-2	Modelo de regresión binomial negativa con parámetros aleatorios no correlacionados	
BNPA-3	Modelo de regresión binomial negativa con parámetros aleatorios correlacionados	
BOE	Boletín Oficial del Estado	
CARE	<i>Community database on Accidents on the Roads in Europe</i>	Base de datos de la UE sobre accidentes de tráfico
cc	Centímetros cúbicos	
CC.AA.	Comunidades Autónomas	
CPV	<i>Common Procurement Vocabulary</i>	Vocabulario Común de Contratos Públicos
DGSCA NP	Delegación del Gobierno en las Sociedades Concesionarias de Autopistas Nacionales de Peaje	
DG-MOVE	Dirección General de Movilidad y Transportes.Comisión Europea	
DGC	Dirección General de Carreteras	
DGT	Dirección General de Tráfico	
DID	Diferencias en Diferencias	
DRAG	<i>Demande Routière, Accidents et Gravité</i>	Modelo basado en la exposición, frecuencia de accidentes y severidad
EE.UU.	Estados Unidos	
ECM	<i>European Climatic Energy Mixes</i>	Base de datos del Servicio de Cambio Climático del programa Copernicus
ERSO	<i>European Road Safety Observatory</i>	Observatorio Europeo de la Seguridad Vial
ESIF	<i>European Structural and Investment Funds</i>	Fondos estructurales de la Unión Europea
ETSC	<i>European Transport Safety Council</i>	Consejo europeo sobre seguridad en el tráfico
FPNB	<i>Fixed parameters negative binomial model</i>	Modelo de regresión binomial negativa con parámetros fijos
GLM	Generalized Linear Model	Modelo Lineal Generalizado
GWR	<i>Geographically Weighted Regression</i>	Regresión ponderada geográficamente
i.i.d.	Independientes e Idénticamente Distribuidos	
IMD	Intensidad Media Diaria	
INE	Instituto Nacional de Estadística	
IRTAD	International Traffic Safety Data and Analysis Group	Grupo de trabajo permanente sobre la seguridad vial perteneciente al ITF
ITF	International Transport Forum	Foro Internacional del Transporte. Perteneciente a la OCDE

LISTADO DE ACRÓNIMOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS

LSDV	Least Squares Dummy Variable	Modelo de mínimos cuadrados ordinarios con variables ficticias
MA	<i>Moving Average</i>	Medias Móviles
MCG	Mínimos Cuadrados Generalizados	
MCGF	Mínimos Cuadrados Generalizados Factibles	
MCO	Mínimos Cuadrados Ordinarios	
NUTS	<i>Nomenclature des Unités Territoriales Statistiques</i>	Nomenclatura de las Unidades Territoriales Estadísticas
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico	
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible	
OMS	Organización Mundial de la Salud	
ONU	Naciones Unidas	
PCOE	Países Centrales y Orientales de Europa	
PCSE	<i>Panel-Corrected Standard Errors</i>	Método de errores estándar corregidos por panel
PGE	Presupuestos Generales del Estado	
PIB	Producto Interior Bruto	
POE	Países Occidentales de Europa	
PPS	<i>Purchasing Power Standard</i>	Paridad de Poder Adquisitivo
PRA	Países de Rentas Altas	
PRB	Países de Rentas Bajas	
PTW	<i>Powered Two-Wheeler</i>	Vehículo de Dos Ruedas Motorizado
RSA	<i>Road Safety Authority</i>	Autoridad de seguridad vial de Irlanda
RTE	Red viaria transeuropea	
SCP	Sistema de Carnet por Puntos	
SEITT	Sociedad Estatal de Infraestructuras del Transporte Terrestre	
TSCS	<i>Time-Series Cross-Sectional</i>	Series Temporales de Sección Cruzada
UE	Unión Europea	
UNECE	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i>	Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa
V2RM	Vehículos de Dos Ruedas Motorizados	

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Capítulo 1:

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los accidentes de tráfico constituyen uno de los principales problemas de salud pública a nivel mundial, además de un asunto primordial en la mayoría de políticas de transporte nacionales. Las cifras de víctimas asociadas al transporte por carretera son alarmantes. De hecho, las muertes derivadas de un accidente de tráfico han pasado de ser la octava causa de muerte no natural a nivel global en 2007 a convertirse en la sexta causa en 2017, con una cifra anual de víctimas de 1,2 millones de personas (GBD 2017 Causes of Death Collaborators, 2018). Desglosando estas cifras por franjas de edades, la Organización Mundial de la Salud (OMS/WHO) señala a los accidentes de tráfico como la primera causa de muerte para los jóvenes entre 5 y 29 años de edad y la cuarta para la franja de edad entre 30 y 44 años (WHO, 2018). Teniendo en cuenta que las muertes por accidentes de tráfico son consideradas como ampliamente evitables, Naciones Unidas (ONU) propuso una drástica reducción mundial de las cifras de fallecidos como uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), concretamente el objetivo 3.6. Sin embargo, el último informe

de seguimiento de los ODS prácticamente da por descartado el haber alcanzado dicho objetivo en 2020 (Naciones Unidas, 2020). Esta situación vuelve a poner en evidencia uno de los grandes retos que afronta el transporte por carretera para convertirse en un medio sostenible —tanto a nivel económico como social—, y mantiene la vigencia sobre la necesidad de investigar sobre las causas que los producen, de cara a tratar de evitarlos.

En Europa la situación es más favorable que en el resto del mundo, pero aun así, 18.786 personas perdieron la vida en 2020 como consecuencia de un accidente de tráfico (Eurostat, 2022). La Estrategia de Seguridad Vial Europea planteó reducir un 50% el número de fallecidos en 2020 respecto a la cifra de 2010, no obstante, este objetivo no se ha alcanzado. Aunque las cifras de víctimas reflejan un descenso del 37% con respecto a las de 2010, la interpretación de este descenso debe analizarse cautelosamente y considerar las circunstancias especiales derivadas de la pandemia de COVID-19 junto con las restricciones de movilidad asociadas a la misma (ITF, 2021). De hecho, según el European Transport Safety Council (ETSC), un 17% del descenso total de víctimas ocurrido en la última década se concentra entre 2019 y 2020 (ETSC, 2021). No obstante, y siguiendo el enfoque a largo plazo de Visión Cero¹ impulsado por la UE para 2050, se ha vuelto a fijar un objetivo intermedio de reducción del 50%, respecto a 2019, en el número de muertes y heridos graves para 2030, siendo este último indicador incluido por primera vez en los planes estratégicos de seguridad vial (Council of the European Union, 2017; European Commission, 2020; European Parliament, 2021; European Transport Safety Council (ETSC), 2019).

España ha seguido una tendencia similar en las últimas dos décadas a la de otros países de la UE: el periodo 2001-2010 ha estado caracterizado por una enorme mejora de la seguridad vial, mientras que la década 2011-2020 se ha visto marcada por una ralentización y estancamiento en el proceso de reducción de las cifras de siniestralidad, al menos hasta 2019, ya que este estancamiento se vio fuertemente alterado con las cifras de 2020, las cuales mostraron una reducción del 22% respecto a las del año anterior, influenciadas en gran medida por las restricciones de movilidad derivadas de la pandemia de COVID-19 (Dirección General de Tráfico (DGT), 2022a). De forma general para todo el periodo 2011-2020, se ha producido una reducción del 33%, muy alejada del objetivo del 50% propuesto en la Estrategia de Seguridad Vial 2011-2020. Ante este escenario, una vez más resulta necesario y de vital importancia la investigación sobre los factores influyentes en la siniestralidad vial.

A grandes rasgos, los factores influyentes en la tasa de accidentes y en su severidad pueden clasificarse en tres amplias categorías, siendo éstas: el usuario, el vehículo y la infraestructura (Elvik et al., 2009). Centrando la cuestión en la infraestructura viaria, una forma de tratar de reducir la siniestralidad vial es mediante la mejora de la red de carreteras (construyendo variantes de trazado, transformando carreteras convencionales en autovías, etc.), y fomentando el mantenimiento que permita el mejor estado posible de la red. Estas

¹ El concepto de Visión Cero parte del principio fundamental de que nadie resulte muerto o herido grave en el sistema de transporte por carretera. Este concepto se introdujo originalmente en Suecia en 1997 dentro del proyecto de ley 1996/97:137 “*Nollvisionen och det trafiksäkra sambället*”.

actuaciones que afectan a la seguridad vial se materializan y están condicionadas por los recursos económicos destinados a las carreteras, los cuales se suelen desglosar en inversión en construcción y gasto en mantenimiento. En la Unión Europea, la inversión en infraestructuras del transporte ha representado históricamente unos valores en torno al 1% del PIB (European Investment Bank, 2016). No obstante, la crisis financiera de 2008 y la crisis de deuda soberana de 2011-2012 mermaron las inversiones durante la década 2010-2020. Así pues, en 2016, la cifra total de inversiones destinadas a la construcción de carreteras por el conjunto de países de la UE fue de 69.000 millones de euros, y el gasto en mantenimiento de 38.000 millones, reflejando un nivel de inversión y gasto comparable con el de 1995 (European Commission, 2019). Este retroceso en los niveles de inversión ha puesto en compromiso la calidad de red de carreteras de la mayoría de estados de la UE. Según la Comisión Europea (2018), se ha detectado un serio déficit de mantenimiento de la red viaria en doce países², aunque la preocupación por el deterioro también es trasladable al resto. En el caso particular de España, la Asociación Española de la Carretera (AEC) advertía de las crecientes necesidades en materia de conservación, cifrando en 7.500 millones de euros el déficit a cubrir para que las carreteras del país vuelvan a un estado de servicio adecuado (AEC, 2020).

Además, este periodo de recortes en inversiones viarias coincide, a partir de 2013, con una ralentización del descenso en el número de fallecidos en las carreteras de la UE, tan solo un 6% entre 2013 y 2019, mientras que se había previsto un objetivo de reducción de aproximadamente el 30% para el mismo periodo (European Transport Safety Council (ETSC), 2021). Por tanto, cabe preguntarse sobre la posible relación del descenso en las inversiones destinadas a la infraestructura viaria a partir de la crisis económica de 2008 y la ralentización del proceso de reducción de la mortalidad entre 2013 y 2019.

Aparte de las pérdidas humanas y el sufrimiento que los accidentes conllevan, la siniestralidad vial tampoco es sostenible desde el punto de vista económico. La Comisión Europea calcula el coste asociado a los accidentes en base a la suma de cinco componentes: el coste humano, los costes médicos, los costes administrativos, la pérdida de producción, los daños materiales y otros costes. Para el caso de fallecimientos en carreteras, la cantidad alcanza los 3.273.909 € por persona (European Commission. Directorate General for Mobility and Transport, 2019), por lo que solo el coste asociado a la pérdida de vidas en 2020 sería de 61.700 millones de euros³. Algunos autores han llegado a estimar que los accidentes de tráfico suponen un coste equivalente entorno al 3% del Producto Interior Bruto (PIB), lo que pone nuevamente el evidencia la magnitud de este problema (Elvik, 2000; Wijnen and Stipdonk, 2016).

Teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente, diversas instituciones internacionales han resaltado el papel de las inversiones en carreteras dentro de sus estrategias actuales de mejora de la seguridad vial. Así, la UE las nuevas inversiones en carreteras y el adecuado mantenimiento de la infraestructura existente a lo largo de su ciclo de vida como

² Austria, Bélgica, Bulgaria, Dinamarca, España, Estonia, Hungría, Italia, Letonia, Lituania, Polonia y Rumanía.

³ Tanto la cifra unitaria del coste por persona como la estimación global para la UE27 están expresadas en euros de 2015 ajustados en paridad de poder adquisitivo (PPS).

recomendaciones clave durante la década presente (European Commission, 2020). Por su parte, la OMS resalta la escasa inversión en seguridad vial cuando se compara con la destinada a otras causas de muerte como el VIH/SIDA o la tuberculosis, y a las que supera en cifras de mortalidad anual (WHO, 2018). Por otro lado, Naciones Unidas ha proclamado el periodo 2021-2030 como el “Segundo Decenio para la Acción en Seguridad Vial”, en el cual se invita a los estados miembros a aumentar la inversión en seguridad vial a todos los niveles, incluyendo en esta dotación de recursos económicos a las mejoras en la infraestructura viaria (United Nations, 2020a). Sin embargo, a pesar de las potenciales implicaciones prácticas para las políticas de gasto y salud pública, así como para las estrategias de seguridad vial, no se han encontrado estudios de ámbito internacional que exploren la relación entre los recursos económicos invertidos en carreteras y seguridad vial.

Por otro lado, una creciente preocupación a nivel mundial en términos de seguridad vial son los usuarios de Vehículos de Dos Ruedas Motorizados (V2RM). Si bien el objetivo global de reducción de la mortalidad de motociclistas propuesto por Naciones Unidas para 2020 tampoco se ha alcanzado (Yasin et al., 2022), el incremento de la movilidad mediante este modo de transporte —que cuenta con la mayor tasa de accidentes (Elvik, 2010; Kweon and Kockelman, 2003)—supone un reto adicional para las políticas y estrategias de seguridad vial vigentes. En España, de forma similar a otros países europeos, el parque de motocicletas y ciclomotores se ha incrementado un 9,4% en el periodo 2013-2019, y estos usuarios han pasado a representar el 25% del total de fallecidos en 2019 (Fundación MAPFRE, 2021). La situación de este tipo de usuarios especialmente vulnerables ha llevado al desarrollo de planes específicos para la mejora de su seguridad (DGT, 2019, 2007), con el objetivo de implementar la Visión Cero y el marco estratégico de Sistema Seguro⁴. En este contexto, tanto los enfoques de Sistema Seguro como la Visión Cero, ya se destaca la importancia de la infraestructura viaria y de su diseño (Kristianssen et al., 2018). Y es que, según el Parlamento Europeo, los conductores de motocicletas y ciclomotores son más susceptibles que otro tipo de usuarios a las dificultades y peligros derivados del estado del pavimento, diseño, construcción, mantenimiento de las carreteras (European Parliament: DG for Internal Policies, 2014). Estos factores de riesgo están estrechamente vinculados con los recursos económicos que se destinan a las carreteras durante su ciclo de vida. No obstante, tampoco se ha encontrado en este caso, ningún estudio que analice la influencia de dichas inversiones y la ocurrencia de accidentes de motocicletas.

Por tanto, la presente tesis doctoral pretende avanzar en el conocimiento de los factores influyentes en la seguridad vial mediante el análisis de la relación entre los recursos económicos destinados a las carreteras y la siniestralidad vial. Para ello se plantean tres casos de estudio:

- 1) Análisis de la influencia de los recursos económicos destinados a carreteras y siniestralidad a nivel europeo;

⁴ El enfoque Sistema Seguro consiste en que todos los elementos del sistema deben reforzarse con el fin de multiplicar su efecto y para asegurar que si uno falla, el resto de los elementos proporcionará una protección suficiente (ITF, 2016)

- 2) Análisis de dicha influencia en la mortalidad, en función del nivel de desarrollo económico de los países;
- 3) Análisis de la influencia de los recursos económicos destinados a carreteras sobre la ocurrencia de accidentes de motocicletas a nivel nacional (España).

1.2 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En este epígrafe se describe brevemente el contenido de los ocho capítulos que componen el presente documento:

El **Capítulo 1** incluye el planteamiento del problema, la organización de la Tesis Doctoral y las principales aportaciones derivadas del documento.

El **Capítulo 2** presenta una revisión del estado del arte. Esta revisión se divide en tres apartados, según el ámbito de estudio, variable dependiente considerada, y el tipo de vehículo. En primer lugar, se incluyen estudios de ámbito internacional que consideran factores socioeconómicos en sus análisis de seguridad vial. En segundo lugar, se incluyen estudios de ámbito nacional que consideran variables de inversión en sus análisis de siniestralidad vial. Y, en tercer lugar, se revisan aquellos estudios que consideran alguna medida de la exposición al riesgo específica para V2RM.

El **Capítulo 3** enuncia los objetivos del presente trabajo de investigación, distinguiéndolos en principales y secundarios, e incluye una serie de hipótesis.

El **Capítulo 4** expone la metodología empleada. Este capítulo se estructura en dos bloques amplios. El primero de estos bloques trata sobre la formación de las bases de datos utilizadas en los ámbitos europeo y español. El segundo bloque describe los enfoques estadísticos utilizados para los tres casos de estudio.

El **Capítulo 5** muestra los resultados obtenidos con los distintos modelos econométricos planteados y se realiza una discusión de los mismos. Estos resultados se muestran según los tres casos de estudio.

El **Capítulo 6** recoge las conclusiones derivadas del presente trabajo de investigación.

El **Capítulo 7** plantea futuras líneas de investigación que se han identificado durante el desarrollo de la Tesis Doctoral.

Y, por último, el **Capítulo 8** lista todas las referencias consultadas para la elaboración de esta tesis.

1.3 PRINCIPALES APORTACIONES

Las principales contribuciones de esta tesis son cuatro artículos en revistas científicas indexadas en JCR, que ya se encuentran publicados, y tres comunicaciones en congresos. Las mencionadas contribuciones son las siguientes:

C1. Artículos publicados en revistas de alto impacto.

Artículo 1. Calvo-Poyo, F., Navarro-Moreno, J., de Oña, J., 2020. Road Investment and Traffic Safety: An International Study. *Sustainability* 12 16, 6332. doi:10.3390/su12166332

Artículo 2. Navarro-Moreno, J., Calvo-Poyo, F., de Oña, J., 2023. Influence of road investment and maintenance expenses on injured traffic crashes in European roads. *Int. J. Sustain. Transp.* 17 6, 649–659. doi:10.1080/15568318.2022.2082344

Artículo 3. Navarro-Moreno, J., Calvo-Poyo, F., de Oña, J., 2023. Investment in roads and traffic safety: linked to economic development? A European comparison. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30 3, 6275–6297. doi:10.1007/s11356-022-22567-y

Artículo 4. Navarro-Moreno, J., de Oña, J., Calvo-Poyo, F., 2023. How do road infrastructure investments affect Powered Two-Wheelers crash risk? *Transp. Policy* 138 May, 60–73. doi:10.1016/j.tranpol.2023.04.016

C2. Comunicaciones en congresos

Congreso 1. Navarro-Moreno J., Calvo-Poyo F., Garach L., De Oña J., 2021. Influencia del gasto en construcción y mantenimiento de carreteras en la seguridad vial en el contexto europeo. XIV Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT2021): R-Evolucionando el transporte. Burgos, España. 6-8, julio 2021.

Congreso 2. Calvo-Poyo F., Navarro-Moreno J., De Oña J., 2021. Efecto de los recursos económicos invertidos en construcción y mantenimiento de carreteras sobre la accidentabilidad en Europa. 20º Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte (CCHIT 20). Online. 25-27, octubre 2021.

Congreso 3. Navarro-Moreno, J., de Oña, J., Calvo-Poyo, F., 2023. Recursos económicos dedicados a las carreteras y sus efectos sobre la seguridad vial de motociclistas en España. XV Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT2023). Tenerife, España. 14-16, junio 2023.

CAPÍTULO 2.

ESTADO DEL ARTE

Capítulo 2:

2 ESTADO DEL ARTE

La revisión del estado del arte se estructura en tres apartados. En los dos primeros se describen estudios de seguridad vial referentes a todo tipo de vehículos, mientras que el tercero se centra en estudios específicos para motocicletas. El primer apartado se dedica a revisar aquellos estudios que tienen un ámbito internacional y en los que se tienen en cuenta aspectos socioeconómicos generales. El segundo apartado incluye aquella bibliografía que cubre un ámbito nacional y en la que sí se consideran los recursos económicos destinados a carreteras como factor explicativo de la siniestralidad vial. Por último, el tercer apartado recopila aquellos estudios que incluyen alguna medida de exposición al riesgo específica para las motocicletas.

2.1 ESTUDIOS DE ÁMBITO INTERNACIONAL

En análisis a nivel internacional no se han encontrado estudios que abarquen distintos países y evalúen los efectos de los recursos económicos invertidos en carreteras sobre la seguridad vial. Por otro lado, sí que existen numerosos estudios a nivel macro que consideran indicadores de tipo socioeconómico como parte de los factores influyentes en la seguridad vial. Así pues, Elvik (2015) realizó una revisión de 20 estudios que analizaban los mecanismos

por los que factores socioeconómicos influyen en la seguridad vial. Con ello, formuló un modelo para 14 países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) y pudo vincular la recesión de 2009-2010 con una reducción de 4.850 muertes en el conjunto de los países seleccionados.

Dentro de los factores socioeconómicos, la renta per cápita y la tasa de desempleo son los más utilizados. Así, Van Beeck et al. (2000) utilizaron la renta per cápita para analizar la relación entre el nivel de prosperidad de 21 países de la OCDE y los accidentes de tráfico mortales. Los resultados mostraron que dicha relación cambiaba de signo llegado a cierto nivel de prosperidad. Así, hasta un determinado nivel, el desarrollo económico se asociaba con un incremento de la mortalidad vial, tendencia que se invertía a partir de dicho nivel. Por su parte, Kopits y Cropper (2005) profundizaron en la cuestión mediante el análisis de un panel con 88 países y distinguiendo según la región geográfica a la que pertenecían. De esta forma, y controlando la tendencia temporal específica de cada región, observaron que la tasa de mortalidad (fallecidos por número de habitantes) comenzaba a disminuir a partir de una renta per cápita de 8.000\$ (dólares internacionales constantes de 1985). Por otro lado, Gerdtham y Ruhm (2006) estudiaron la relación de las condiciones macroeconómicas de 23 países de la OECD con respecto a diversas causas de muerte, entre las que se encontraban las provocadas por accidentes de tráfico. Para ello, utilizaron la tasa de desempleo como control de la situación del mercado laboral. Como principales resultados, hallaron que un descenso del 1% del desempleo provocaría un incremento del 2,1% en cifras de muertos en carretera.

Continuando con el análisis de la relación entre la riqueza y la seguridad vial, Bishai et al. (2006) estudiaron la influencia del PIB per cápita sobre la mortalidad de 41 países, agrupados en países de ingresos altos y bajos. Los resultados mostraron que un aumento del 10% de la renta per cápita en un país de renta baja provocaría un incremento del 7,9% de los accidentes, 4,7% de heridos y 3,1% de muertos. Por contrario, en el caso de países más ricos, el incremento del PIB estaría asociado con una reducción en el número de muertos, aunque no de accidentes o heridos. Posteriormente, Gaygisiz (2009) añadió a los indicadores económicos ya comentados (PIB per cápita y tasa de desempleo), el índice de Gini y otra una serie de variables relativas a características culturales. La autora encontró una relación entre condiciones económicas favorables (alta renta per cápita, bajo nivel de desempleo y baja desigualdad de ingresos) y una mejor seguridad vial.

Las variables desempleo y renta per cápita son las más utilizadas para reflejar la situación socioeconómica de un país y estudiar su influencia en la seguridad vial, aunque también se utilizan otras (como la tasa de motorización, el gasto en sanidad, etc.). En consecuencia, Economou et al. (2008) realizaron un estudio sobre la relación entre el desempleo y diez causas de muerte para 13 países europeos, siguiendo el análisis realizado por Ruhm (2000) para EE.UU. Aunque encontraron una relación directa entre condiciones económicas adversas y mortalidad (al contrario que en Ruhm (2000)), respecto a las cifras de víctimas mortales de accidentes de tráfico, sí pudieron comprobar que éstas se reducían al aumentar la tasa de desempleo. Por otro lado, Yannis et al. (2011) utilizaron dos indicadores socioeconómicos, tasa de motorización y población, para modelar la tendencia de las cifras de fallecimientos de 8 países de la UE e identificar los puntos en los que se produce un

cambio de la misma. Por su parte, Castillo-Manzano et al. (2014) utilizaron, además del GDP per cápita o la tasa de motorización, otra serie de variables socioeconómicas relacionadas con el sistema sanitario de 27 países de la UE. Los autores obtuvieron evidencias sobre la contribución de la densidad de camas hospitalarias y el gasto público en sanidad en la reducción de muertes en carretera, de igual forma que el PIB per cápita y la tasa de motorización mostraron un efecto beneficioso sobre la seguridad vial.

Profundizando en la relación entre aspectos socioeconómicos y mortalidad en carretera, Antoniou et al. (2016) analizaron el PIB y el número de fallecidos de 30 países europeos mediante modelos de series temporales, lo que les permitió caracterizar la naturaleza de la serie temporal de cada uno de ellos y advertir de la necesidad de conocerla en la formulación de macro paneles, ya que, según los resultados, la elasticidad muestra distinto signo en función del estimador utilizado. Por su parte, Nikolaou y Dimitriou (2018) utilizaron, además del PIB, otros factores socioeconómicos y demográficos para evaluar el nivel de seguridad vial de 23 países de la UE respecto a los objetivos planteados. Además, establecieron 4 agrupaciones de países e identificaron a aquellos que mostraban mejor y peor desempeño. Castillo-Manzano et al. (2020) utilizaron diversos indicadores socioeconómicos de los 28 países de la UE para analizar si la intervención financiera efectuada por la denominada Troika (Comisión Europea, Banco Central Europeo y Fondo Monetario Internacional) en Chipre, Grecia, Irlanda, Portugal y España, tuvo algún efecto sobre las cifras de accidentes y víctimas mortales. De los resultados obtenidos concluyeron que la intervención financiera no mostró ningún tipo de impacto en la seguridad vial de esos cinco países. Por su parte, Stickley et al. (2021) estudiaron las desigualdades educacionales y los cambios macroeconómicos producidos durante la década del 2000 en los países bálticos (Estonia, Letonia y Lituania) y Finlandia. Con ello, pudieron observar que las cifras de fallecidos presentaban una mayor reducción en los países bálticos que en Finlandia, y que el impacto de la recesión económica también se acentuaba en éstos. Además, señalaron la importancia que las inversiones en carreteras y el acceso a mejores coches podían haber tenido en la reducción de la mortalidad.

Por otro lado, Law (2015) investigó la relación entre crecimiento económico y accidentes con heridos con un panel de 90 países. Estos países fueron analizados de manera independiente en dos amplios grupos: países altamente desarrollados (30) y países menos desarrollados (60). Como resultado destacable, el autor encontró una relación en forma de U invertida, o curva de Kuznet, para ambos grupos. De esta manera, el crecimiento económico se asocia en una primera fase con un incremento de accidentes, y, tras alcanzar un punto de inflexión, el crecimiento económico se vincula con una reducción de accidentes. Yaseen et al. (2018) plantearon el ámbito de estudio en 30 países de la OECD y exploraron las asociaciones a corto y largo plazo de diversos factores socioeconómicos y medioambientales con las cifras de fallecidos en carretera. Como resultado más significativo, los autores vincularon una reducción del 0,947% en el número de fallecidos por cada incremento del 1% en gasto sanitario. Ali et al. (2019b) realizaron una comparación por continentes sobre los posibles factores, principalmente socioeconómicos, asociados a las cifras de fallecidos de 42 países de ingresos altos. Para ello, dividieron los países en tres paneles (Asia, Europa y América) y calcularon las elasticidades de los distintos factores. Los resultados mostraron diferentes relaciones según el impacto temporal y el ámbito geográfico. Así, el incremento

del PIB per cápita se asoció a largo plazo con una disminución de las muertes en Europa y América, mientras que, a corto plazo, ocurría lo contrario en Asia y en Europa. En un estudio similar, Ali et al. (2019a) también dividieron un total de 27 países de ingresos medios-altos según continente (Asia, Europa y América). En esta ocasión, los resultados mostraron que el incremento del PIB per cápita estaba asociado a un incremento de la mortalidad en los tres continentes, tanto a corto como a largo plazo. Por otro lado, el incremento del gasto en sanidad apareció vinculado con una reducción a largo plazo de la mortalidad.

Resumiendo, todos estos estudios internacionales utilizan datos de panel, en los cuales se combina una dimensión transversal (países) y otra temporal (años). De cara a obtener suficientes observaciones con las que formular modelos de regresión, este tipo de estudios tratan de conjugar la mayor cantidad de países a incluir y el periodo temporal más largo. Se observa que los datos condicionan las variables consideradas en los estudios de referencia (principalmente debido a su disponibilidad y comparabilidad entre ellos), así como el ámbito y el periodo de estudio. Así, en las referencias recogidas en la Tabla 1 se refleja esta combinación de parámetros: en algunos predomina la dimensión transversal o número de países, como el de Paulozzi et al. (2007), en el que se consideran 44 países; en otros lo hace la dimensión temporal, como el de Antoniou et al. (2016), con un periodo de 37 años; y en otros, se encuentra un mayor equilibrio entre ambas dimensiones, como en Gerdtham y Ruhm (2006), en el que se consideran: 23 países y 17 años.

En cuanto a la metodología estadística empleada, las referencias consultadas pueden englobarse en dos categorías amplias según el tipo de modelo formulado. De esta forma, pueden distinguirse aquellos estudios que optan por formular algún tipo de modelo de regresión lineal y aquéllos que utilizan modelos de datos de recuento. Dentro de esta categorización, y tal como se puede observar en la Tabla 1, la mayoría de estudios internacionales emplean regresiones lineales en sus análisis. A su vez, se pueden encontrar diversas configuraciones en este tipo de modelos, principalmente para tratar el incumplimiento de la asunción de independencia entre las observaciones de series temporales. Para ello, y según el caso de análisis, se incorporan: efectos fijos por año (también se suelen añadir por país), como en Gerdtham y Ruhm (2006), Bishai et al. (2006), Economou et al., (2008), Law et al. (2009), Castillo-Manzano et al. (2014), Castillo-Manzano et al. (2021); autocorrelaciones de primer orden, como en Yannis et al. (2014) y Castillo-Manzano et al. (2020); o bien, se incluye una tendencia temporal, generalmente lineal, como en Kopits y Cropper (2005), Gerdtham y Ruhm (2006), Castillo-Manzano et al. (2020). En el caso de modelos de datos de recuento, el enfoque más habitual es el que utiliza una regresión binomial negativa, y en el que, además, también se suelen incluir efectos fijos tanto por país como por año, tal y como puede verse en Law et al. (2009), Law (2015) y Castillo-Manzano et al. (2021).

Dentro de los indicadores de tipo socioeconómico utilizados en estudios internacionales destaca el uso del PIB, o más específicamente, el PIB per cápita. En la selección de estudios mostrada en la Tabla 1, diecisiete de ellos incluyen alguno de estos indicadores como factor explicativo en sus modelos de seguridad vial, siendo el uso del PIB per cápita es el más frecuente. Por otro lado, también es común encontrar la tasa de desempleo y la tasa de motorización (número de vehículos por habitante) como indicadores relacionados con el

nivel de actividad económica o la riqueza de un país, y diversos porcentajes de estratos poblacionales como indicadores demográficos. El resto de variables consideradas muestra un espectro más amplio, en función del problema de específico de estudio y a la disponibilidad de datos.

En definitiva, teniendo en cuenta que no se han encontrado estudios a nivel internacional que analicen la influencia que pueden tener los recursos económicos invertidos en carreteras sobre la siniestralidad vial, la presente tesis doctoral pretende cubrir este vacío de conocimiento, de tal forma que se pueda llevar a cabo una mejor gestión de los mismos, de cara a obtener un transporte por carretera más seguro y, por lo tanto, más sostenible. Una de las grandes ventajas de la elaboración de estudios macro a nivel internacional, como los que se han visto en este apartado, es que permiten extraer unas conclusiones generales más amplias que las derivadas del análisis en un país en concreto. Por ello, este enfoque metodológico será igualmente utilizado en el desarrollo del presente trabajo.

Tabla 1. Resumen de estudios internacionales

<i>Artículo</i>	<i>Países</i>	<i>Periodo</i>	<i>Metodología</i>	<i>Variables socioeconómicas</i>	<i>Otras variables</i>
Ruhm (2000)	EE.UU.	1972-1991	Regresión lineal con efectos fijos	Tasa de desempleo, PIB per cápita, población, nivel de educación	-
Van Beeck <i>et al.</i> (2000)	21 OCDE	1962-1990	Regresión lineal simple	PIB per cápita	-
Kopits y Cropper (2005)	88	1963-1999	Regresiones lineal y log-lineal	PIB per cápita	-
Gerdtham y Ruhm (2006)	23 OCDE	1960-1977	Regresión lineal con efectos fijos	Tasa de desempleo, PIB per cápita, población (género y edad)	-
Bishai <i>et al.</i> (2006)	41	1992-1996	Regresión lineal con efectos fijos	PIB per cápita, parque de vehículos, población, consumo de bebidas alcohólicas	Petróleo para transporte, extensión de la red
Paulozzi <i>et al.</i> (2007)	44	1998-2002	Regresiones lineal, cuadrática y cúbica	PIB per cápita, tasa de motorización	-
Economou <i>et al.</i> (2008)	UE-13	1977-1996	Regresión lineal con efectos fijos	Tasa de desempleo, población (densidad, edad, educación), admisiones hospitalarias, hábitos de consumo (alcohol, tabaco, calorías disponibles)	Emisiones de dióxido de carbono (CO ₂)

<i>Artículo</i>	<i>Países</i>	<i>Periodo</i>	<i>Metodología</i>	<i>Variables socioeconómicas</i>	<i>Otras variables</i>
Gaygisiz (2009)	30 OCDE y 5 países candidatos	-	Correlación de Pearson y correlación parcial	PIB per cápita, Índice de Gini, tasa de desempleo	Dimensiones culturales de Hofstede, valores de Schwartz, personalidad
Law <i>et al.</i> (2009)	25 países	1970-1999	Regresión binomial negativa con efectos fijos	PIB per cápita, población (edad), motocicletas per cápita, tasa de mortalidad infantil, médicos per cápita, índice de GINI, índice de corrupción, índice de derechos políticos	Ley de uso del casco
Law (2015)	90 países	1963-2009	Regresión binomial negativa con efectos fijos	PIB per cápita, población (edad, urbana-rural), tasa de motorización, motocicletas per cápita, consumo de alcohol	Índice de estabilidad política, índice de democracia
Yannis <i>et al.</i> (2011)	8 países europeos	1960-2009	Regresión segmentada lineal	Tasa de motorización, población	-
Castillo-Manzano <i>et al.</i> (2014)	UE-27	1999-2009	Regresión lineal con efectos fijos, regresión de Poisson y método de Arellano-Bond	Gasto en sanidad, densidad de camas hospitalarias, PIB per cápita, tasa de motorización, porcentaje de mayores	Veh-km, densidad de vías de gran capacidad, tasa de alcohol en sangre, carnet por puntos, límites de velocidad
Yannis <i>et al.</i> (2014)	UE-27	1975-2011	Modelos lineales mixtos	PIB per cápita	-

<i>Artículo</i>	<i>Países</i>	<i>Periodo</i>	<i>Metodología</i>	<i>Variables socioeconómicas</i>	<i>Otras variables</i>
Elvik (2015)	14 OCDE	1970-2010	Regresión binomial negativa, regresión lineal y modelo lineal mixto	PIB per cápita, tasa de desempleo	-
Nikolaou y Dimitriou (2018)	UE-23	2005-2014	Análisis envolvente de datos	PIB per cápita, valor añadido industrial, subcripciones de teléfonos móviles, tasa de desempleo, usuarios de internet, consumo de energía del sector transportes	Superficie
Castillo-Manzano et al. (2020)	UE-28	1995-2015	Ecuaciones de estimación generalizadas	PIB per cápita, edad mediana, densidad de población, intervención financiera, población	Tasa de alcohol en sangre, carnet por puntos, límite de velocidad, oficina de seguridad vial en Rumanía, densidad de vías de gran capacidad, viajeros-km
Stickley et al. (2021)	4 (Estonia, Letonia, Lituania y Finlandia)	2000-2015	Regresión de Poisson	Nivel educacional (alto, medio, bajo), índice relativo de desigualdad, pendiente del índice de desigualdad	-
Castillo-Manzano et al. (2021)	31 UE + Asociación Europea de Libre Comercio	<i>No indicado</i>	Regresión binomial negativa con efectos fijos	PIB per cápita, edad, densidad de población, población, tasa de motorización	Densidad de vías de gran capacidad, pasajeros-km, viajeros-km, índice de temperatura, tasa de alcohol en sangre, sistema de carnet por puntos,

<i>Artículo</i>	<i>Países</i>	<i>Periodo</i>	<i>Metodología</i>	<i>Variables socioeconómicas</i>	<i>Otras variables</i>
					límite de velocidad, megatrailers
Antoniou <i>et al.</i> (2016)	30 europeos	1975-2012	Modelos de series temporales	PIB	-
Ali <i>et al.</i> (2019a)	27 países de ingresos medios-altos	1994-2016	Modelo de corrección del vector de error y método de los momentos generalizado	PIB per cápita, gasto en sanidad	Densidad de población, precipitación
Ali <i>et al.</i> (2019b)	42 países de ingresos altos	2005-2014	Modelo de corrección del vector de error y método de los momentos generalizado	PIB per cápita, tasa de motorización, gasto en educación, esperanza de vida, número de médicos	Carreteras pavimentadas, índice sobre leyes de tráfico, urbanización

<i>Artículo</i>	<i>Países</i>	<i>Periodo</i>	<i>Metodología</i>	<i>Variables socioeconómicas</i>	<i>Otras variables</i>
Yaseen et al. (2018)	30 OCDE	1995-2015	Modelo de corrección del vector de error, mínimos cuadrados ordinarios completamente modificados y mínimos cuadrados dinámicos	Inversión extranjera directa, gasto en salud, comercio, subscripciones de teléfonos móviles, investigadores en I+D	Contaminación del aire (PM2.5)

2.2 ESTUDIOS DE ÁMBITO NACIONAL

A nivel nacional sí existen algunos estudios que han incorporado los recursos económicos invertidos en carreteras como factor explicativo de la siniestralidad vial, los cuales se listan a continuación de acuerdo al país de estudio: Noruega (Fridstrøm e Ingebrigtsen, 1991), España (Albalade et al., 2013; Aparicio Izquierdo et al., 2013; Rojo et al., 2018; Sánchez González et al., 2020, 2018), Estados Unidos (Houston et al., 1995; Nguyen-Hoang and Yeung, 2014), China (Sun et al., 2019), Polonia (Brzozowska-Rup and Nowakowska, 2020) y Chile (Sánchez-González et al., 2021). Se describen a continuación estas referencias.

Fridstrøm e Ingebrigtsen (1991) estudiaron los factores determinantes en la ocurrencia de accidentes de tráfico con heridos y su severidad. Para ello, utilizaron datos de panel correspondientes a 18 condados noruegos durante el periodo comprendido entre 1974 y 1986, con una escala temporal de datos mensuales. Los autores formularon modelos para datos de recuento con distribución binomial negativa para seis indicadores de siniestralidad y un modelo Logit binomial para establecer una medida de la severidad. Las variables explicativas se agruparon en nueve grupos: exposición, meteorología, luz diurna, infraestructura viaria, notificación de accidentes, inspección de vehículos, cumplimiento de la ley, conductores y vehículos y alcohol. Dentro del grupo relativo a la infraestructura viaria, se incluyeron dos variables que hacían referencia a los recursos económicos destinados a carreteras, la inversión en formación de capital fijo (construcción de carreteras) y el gasto en mantenimiento. Ambas variables se expresaron en función de la longitud total de la red de carreteras y se desagregaron según la titularidad de vía (autoridades nacionales o comarcales). Los resultados de los modelos mostraron unos resultados consistentes en cuanto a la relación inversa del gasto en mantenimiento y los distintos indicadores de siniestralidad. Por otro lado, los resultados sobre la inversión en construcción reflejaron relaciones contradictorias en función de la titularidad de la vía. De esta forma, las inversiones en construcción de carreteras comarcales se encontraban vinculadas con mejoras en términos de seguridad vial, mientras que las inversiones destinadas a la construcción de carreteras de titularidad nacional se relacionaban con el efecto contrario. Como posible explicación del efecto directo de la construcción de carreteras sobre varios indicadores de riesgo, los autores no descartaron la posibilidad de que se tratase de una correlación espúrea. Esta posibilidad se señalaba como consecuencia del gran coste relativo de algunas obras puntuales (como puentes o túneles), las cuales estarían sobrerrepresentadas en los valores correspondientes a la variable de construcción de una región particular.

En cuanto al resto de variables independientes incluidas en los modelos, también obtuvieron relaciones significativas para la mayoría de ellas. Las variables de exposición mostraron una relación directa para distintos indicadores de riesgo. Dentro de las variables meteorológicas, se encontró una relación inversa para la precipitación en forma de nieve y directa para la precipitación en forma de lluvia. La cantidad de minutos de hora diurna durante las horas punta de tráfico se encontró relacionada de manera inversa con el número de accidentes con heridos. Por otro lado, las variables correspondientes a inspecciones de vehículos no arrojaron resultados concluyentes, mientras que las variables legislativas mostraron resultados ambiguos. Por su parte, la obligatoriedad de usar el cinturón de seguridad en los

asientos delanteros sí mostró un potente efecto beneficioso para la seguridad vial. Por último, y referente al consumo de alcohol, los autores sugirieron que la naturaleza de los datos hacía influir las variables explicativas de distinta forma, pudiendo estar reflejándose algún tipo de correlación espúrea. Así, los datos de series temporales sugerían que el consumo de licor afecta de manera directa a las cifras de accidentes con heridos, mientras que los datos de sección transversal entre condados, parecen indicar lo contrario en cuanto al consumo de cerveza.

Houston *et al.* (1995) estudiaron la efectividad de los cambios legislativos que afectan a la normativa de circulación en Estados Unidos sobre la mortalidad. Como parte del mismo, los autores incluyeron algunas variables de inversión en carreteras como factores explicativos. El análisis contempla datos anuales de 50 estados de EE.UU. durante el periodo comprendido entre 1967 y 1991, mientras que los modelos de datos de panel son estimados a través del método propuesto por Parks (Parks, 1967). Como variable dependiente utilizan una tasa de mortalidad definida como el número de fallecidos por mil millones de vehículos-milla. Por otro lado, las principales variables de interés de este estudio son los cambios normativos relativos a: la obligatoriedad del uso del cinturón de seguridad, el límite máximo de velocidad y la edad mínima legal para consumo de bebidas alcohólicas. No obstante, también incluyen dos variables relativas a la inversión en carreteras: la inversión en construcción por cápita y el gasto en mantenimiento per cápita. Para la inversión en construcción se utiliza la media móvil de tres años, con el fin de evitar variaciones bruscas en las cifras y dar cuenta del impacto producido a más largo tiempo. Adicionalmente, y como forma de aproximarse al cumplimiento de la normativa de circulación, se considera el gasto per cápita en el cuerpo de policía de tráfico. El resto de variables independientes incluidas tienen en cuenta otros aspectos socioeconómicos y meteorológicos: densidad de población, población joven, consumo de alcohol, renta per cápita y temperatura. Los resultados de los modelos mostraron relaciones de distinto signo para las variables de inversión. Por una parte, la inversión en construcción refleja una relación directa con la tasa de mortalidad, mientras que lo contrario ocurre con el gasto en mantenimiento. Aunque se había planteado como hipótesis inicial que el aumento de la inversión en construcción de carreteras estaría asociado a la reducción de la mortalidad, puesto que se crearían carreteras de mejor calidad y se produciría una disminución de la congestión en las ya existentes, los autores no aportan una justificación a este inesperado resultado. Por otro lado, todos los cambios legislativos analizados muestran un efecto reductor de la mortalidad, al igual que el gasto policial y otras variables como la densidad de población y la renta per cápita. Por otro lado, tanto el porcentaje de población joven como el consumo de alcohol reflejan una relación directa respecto a la tasa de mortalidad.

Albalade et al. (2013) realizaron un estudio sobre la influencia de las inversiones en carreteras y la normativa de circulación sobre la siniestralidad vial de las cincuenta provincias españolas. Para ello, se utilizan siete modelos para datos de recuento con distribución binomial negativa y efectos fijos por provincia. En todos ellos, salvo en uno, se incluye una tendencia temporal. El periodo de estudio comprende desde 1990 hasta 2009. Como variables dependientes se utilizan tanto el número de fallecidos y heridos en vías interurbanas como el número total de fallecidos para la red viaria total, incluyendo muertos en entorno urbano. Los cambios

normativos o regulatorios están reflejados en los modelos a través de cinco variables binarias: Reglamento General de Circulación (1992), programas de subvención de renovación de vehículos (1994, 1997), primer programa europeo de seguridad vial (1997), Estrategia Europea de Seguridad Vial 2003-2010 (2003) y la introducción del Sistema de Carnet por Puntos (2006). Como otras variables independientes, además de las inversiones y medidas normativas, se incluye una serie de éstas relativas a la composición de la infraestructura y a aspectos socioeconómicos. La inversión en carreteras se encuentra desagregada entre inversión en construcción y gasto en mantenimiento, ambas variables expresadas en millones de euros por cada mil habitantes durante los dos años previos. Para comprobar la influencia de las variables normativas, los autores plantean primero un modelo sin éstas y luego las agregan en otro, pudiendo comprobar así los cambios en el nivel de significancia de las variables. Como principal resultado cabe destacar la relación inversa entre el gasto en mantenimiento y las cifras tanto de fallecidos como de heridos. Por otro lado, la inversión en construcción de carreteras solo muestra resultados significativos, con relación inversa, cuando no se incluyen las variables de tipo regulatorio. Basándose en estos resultados, los autores resaltan la posibilidad de que un aumento de la demanda generado por la construcción de nuevas infraestructuras, y el mayor riesgo asociado, pudiera haber compensado los efectos beneficiosos, en términos de seguridad vial, que aportan las nuevas infraestructuras. No obstante, también se indica como limitación del estudio y de esta hipótesis, el no disponer de datos relativos al volumen de tráfico. En cuanto al resto de variables consideradas, la tasa de desempleo, el porcentaje de personas mayores y el número de médicos per cápita se encuentran relacionadas de forma inversa con las cifras de fallecidos y heridos. La tasa de motorización se relaciona de forma directa con los fallecidos y de manera inversa con los heridos. Entre las variables normativas, el primer plan europeo de seguridad vial también muestra distinta relación para muertos y heridos, inversa y directa, respectivamente. La introducción en España del sistema de carnet por puntos tiene un efecto reductor de los fallecimientos y heridos. Por otro lado, tanto los programas de subvención de vehículos y motocicletas de 1994 y 1997 como la Estrategia Europea de Seguridad Vial de 2003 muestran una relación directa con los fallecimientos, siendo esta relación no significativa para los números de heridos. Por último, en cuanto a la composición viaria, tan solo se obtiene resultados significativos para la proporción de vías con ancho de calzada comprendido entre 5 y 7 metros, de influencia inversa con los fallecidos. La proporción de vías de gran capacidad y de carreteras con ancho de calzada superior a 7 metros no muestran resultados significativos en ninguno de los modelos.

Aparicio Izquierdo *et al.* (2013) analizaron los principales factores de influencia en la seguridad vial española mediante la aplicación de la metodología DRAG (acrónimo de *Demande Routière, Accidents et Gravité*) propuesta inicialmente por Gaudry (1984). El periodo de estudio abarca desde 1990 hasta 2004 y la frecuencia de los datos es mensual. Los modelos propuestos consisten en el desarrollo de una estructura multicapa que integra tres dimensiones relativas a la seguridad vial: exposición, frecuencia de accidentes y severidad. Estos modelos corrigen la heterocedasticidad y la autocorrelación mediante una transformación Box-Cox. Las variables dependientes utilizadas son el número de accidentes con heridos y de accidentes mortales. Por otro lado, los posibles factores explicativos (19) se clasificaron en diez grupos: exposición, infraestructura, climatología, experiencia de los

conductores, condiciones económicas, días laborables, características del parque automovilístico, vigilancia, velocidad y leyes. Dentro del grupo de factores relativos a la infraestructura, se incluyen el gasto en mantenimiento de carreteras por kilómetro de red y la proporción de vías de gran capacidad. Para la obtención de datos mensuales de dichas variables, se procede a la interpolación de los datos anuales de las mismas. Para el gasto en mantenimiento, los resultados de los modelos muestran distinta relación según la variable dependiente considerada: directa para el caso de accidentes mortales e inversa para los accidentes con heridos. Como consecuencia de este efecto contradictorio, los autores señalaban algunas limitaciones que se deben tener en cuenta a la hora de interpretar los resultados, como, por ejemplo: la ejecución del gasto no tiene por qué corresponderse con el mes de ejecución del mantenimiento, el riesgo de accidentes se puede ver incrementado en determinadas secciones durante los trabajos de mantenimiento o que no se ha tenido en cuenta el posible impacto en los meses siguientes al de ejecución del gasto. Por otro lado, la proporción de vías de gran capacidad sí muestra una relación inversa tanto con el número de accidentes mortales como con el de accidentes con heridos. Respecto al resto de variables independientes, el factor más influyente y con relación directa sobre la ocurrencia de accidentes es la exposición, representada en los modelos por la cantidad de vehículos-km. Otras variables que muestran una relación directa son el porcentaje de conductores noveles, la velocidad y el porcentaje de vehículos con antigüedad superior a diez años. Por otro lado, la vigilancia del tráfico, las mejoras tecnológicas de los vehículos (ABS) y la nombrada red de vías de gran capacidad muestran una relación inversa con el número de accidentes.

Nguyen-Hoang and Yeung (2014) estudiaron el efecto de los recursos económicos invertidos en carreteras sobre la mortalidad en los 48 estados contiguos de EE. UU. El periodo de estudio considerados comprende entre 1968 y 2010. Para evaluar los efectos de los recursos económicos se utilizan dos variables independientes: las inversiones totales per cápita realizadas durante el año anterior y el capital económico acumulado en los diez últimos años, expresado también en unidades per cápita. Las inversiones totales incluyen tanto los recursos económicos destinados a construcción como los correspondientes a reposición y mantenimiento de la red. Por otro lado, para el cálculo del capital económico acumulado, se tiene en cuenta, además de los recursos mencionados anteriormente, una tasa de depreciación anual del 2,02%. También, se incluye una variable ficticia, o *dummy*, que considera si el capital económico acumulado es superior a la mediana. Como resto de variables independientes se incluyen un total de dieciocho de ellas, relativas a aspectos relacionados con los conductores, las regulaciones gubernamentales, factores locales y condiciones económicas. El estudio formula un modelo para datos de recuento con distribución binomial negativa y efectos fijos por estado y año, considerando también una tendencia lineal específica para cada estado. Los resultados del modelo muestran evidencias sobre la relación inversa entre los recursos económicos y la mortalidad. Concretamente, los autores vinculan un aumento unitario del logaritmo de la inversión total per cápita con una disminución del número de fallecimientos equivalente al 2,5%. De forma similar, y en mayor medida, un aumento unitario del logaritmo del capital económico acumulado se relaciona con una disminución del 5,9% en las cifras estatales de fallecidos. Los resultados también muestran que el efecto marginal de las inversiones en carreteras sobre los fallecimientos es menor en aquellos estados con mayor

capital económico acumulado, es decir, en los que más se ha invertido durante los últimos diez años.

Respecto al resto de variables independientes, aquellas que reflejan resultados significativos y de relación inversa con el número de fallecidos son la longitud total de carriles, la normativa de cinturón de seguridad, la edad mínima para comprar cerveza, el índice de precipitación mensual y la tasa de desempleo. Por otro lado, la cantidad de vehículos-milla, el porcentaje de camiones, la velocidad máxima permitida en carreteras interestatales, el índice de temperatura mensual, el producto estatal bruto per cápita, los ingresos per cápita y la densidad de población, muestran una relación directa con el número de fallecidos.

Sánchez González *et al.* (2018) analizaron el impacto producido por las características propias de las 50 provincias españolas sobre la seguridad vial en la red interurbana de carreteras. El periodo de estudio comprende entre 1999 y 2015. Para estudiar dicho impacto e identificar otros factores influyentes, formulan seis modelos de panel de datos con efectos fijos y errores estándares corregidos por panel, tres de ellos considerando un parámetro autorregresivo de primer orden común para todas las provincias, y los otros tres con un parámetro distinto para cada provincia. Como variables dependientes, se usan tres indicadores de riesgo definidos por la gravedad del herido (muerto, herido grave y herido ligero) y en función del nivel de exposición (medido en vehículos-kilómetro). Como variables independientes, se consideran la inversión en construcción de carreteras por kilómetro, el gasto en mantenimiento por kilómetro, el volumen de tráfico, la tasa de motorización, la variación anual de la densidad de población, la tasa de desempleo, la precipitación anual y la proporción de vías de gran capacidad. También, la inversión en construcción y el gasto en mantenimiento se incluyen con el valor del año en curso y con retardos de uno y dos años. La forma de cuantificar el número de víctimas causadas por los efectos de las diferentes características provinciales es mediante la incorporación de una variable ficticia para cada provincia. Como resultados, y en cuanto al comportamiento de los recursos económicos invertidos, se muestra un distinto efecto según la variable dependiente o según del término autorregresivo. Así, cuando se utiliza distinto término autorregresivo por provincia, el gasto en mantenimiento de carreteras muestra un efecto reductor en los tres indicadores, mientras que, por otro lado, cuando se utiliza un término autorregresivo común, solo se observan resultados significativos (y de igual relación inversa) en la tasa de heridos graves. Por otro lado, los resultados de la inversión en construcción no varían según el término autorregresivo utilizado, pero sí en función del indicador de siniestralidad. De esta forma, puede observarse una relación inversa entre la inversión en construcción durante el año en curso y la tasa de heridos graves, mientras que la inversión en construcción con un año de retardo muestra una influencia directa con las tasas de mortalidad y de heridos ligeros. Respecto al resto de factores explicativos, los resultados muestran que la proporción de vías de gran capacidad, la tasa de desempleo y la tasa de motorización contribuyen a la reducción del número de fallecidos, heridos graves y heridos leves. La implantación del sistema de carnet por puntos también contribuye a la reducción del número de fallecidos y heridos graves, pero no obtiene resultados significativos en cuanto a los heridos leves.

Rojo *et al.* (2018) investigaron el impacto sobre la seguridad vial provocado por la disminución del presupuesto destinado a carreteras durante la recesión económica de España

ocurrida entre los años 2009 y 2014. De forma previa al análisis estadístico, realizan una descripción sobre la evolución de los presupuestos de construcción y mantenimiento de carreteras y de tres índices de seguridad vial (riesgo, mortalidad y severidad) entre 2008 y 2016. El índice de riesgo se define como el número de accidentes con heridos dividido por la cantidad de vehículos-kilómetro. De forma similar, el índice de mortalidad expresa la cantidad de fallecidos por vehículo-kilómetro. Y, el índice de severidad se define como el número de fallecidos por cada cien accidentes con heridos. Como método estadístico de análisis se utilizan regresiones lineales en las que la variable dependiente es el índice de riesgo y la variable independiente es el presupuesto de carreteras, o bien el total, o bien el destinado solamente a mantenimiento. Los resultados muestran una relación inversa entre el índice de riesgo y el presupuesto destinado a carreteras, tanto el total como el de mantenimiento, reflejando este último un mayor impacto. Además, se señala que la influencia es mayor en ambos casos al considerar la media de lo invertido en los tres años precedentes.

Los autores también realizan un análisis coste-beneficio en el que plantean tres escenarios de inversión y los accidentes asociados a los mismos. El primero considera durante los cuatro años de análisis que el presupuesto de mantenimiento es equivalente al máximo histórico. El segundo escenario plantea un valor del presupuesto de mantenimiento intermedio entre el máximo histórico y el real. Y, el tercer escenario considera la cifra de mantenimiento realmente ejecutada. Los valores monetarios que se utilizan por fallecido y herido son de 857.648 euros y 159.173, respectivamente. La conclusión que alcanzan es que por cada euro que no se invierte en mantenimiento de carreteras, se genera un coste asociado a las víctimas de accidentes de tráfico que varía entre 0,7 y 2,2 euros.

Sun *et al.* (2019) estudiaron la relación de cinco factores relacionados con la economía, la carretera y la población, y los accidentes de tráfico mortales ocurridos en 31 provincias y ciudades chinas desde 2004 hasta 2016. Para este análisis, utilizaron un modelo de panel de datos con efectos fijos en el que la variable dependiente es el número de fallecidos y las variables independientes son el producto interior bruto, la inversión en infraestructuras viarias, los ingresos per cápita, el incremento del kilometraje de carreteras, el incremento de población y el incremento de vehículos. Los resultados muestran una relación inversa entre las inversiones en carreteras y el número de fallecidos, concretamente, los autores vinculan una reducción media del número de muertes de 13,93 por cada incremento anual de 100 millones de yuanes chinos. El incremento del producto interior bruto también se relaciona de forma inversa con los fallecidos. Por otro lado, los incrementos de la red de carreteras, de población y de vehículos se encuentran relacionados de forma directa con las cifras de fallecidos.

Sánchez-González *et al.* (2020) analizaron las consecuencias de las desigualdades regionales de las 50 provincias españolas sobre los accidentes de tráfico. El estudio cubre el periodo comprendido entre 1999 y 2015. Para identificar las desigualdades regionales, se clasificaron las provincias en dos grupos según la renta per cápita media entre 2000 y 2015, ponderada sobre el producto interior bruto. El análisis estadístico se realiza mediante la formulación de modelos diferentes para cada grupo, “provincias con alta renta per cápita” y “provincias con baja renta per cápita”. Los modelos formulados son de datos de panel con efectos fijos y errores estándares corregidos por panel, en los que también se considera una estructura

autorregresiva de primer orden específica para cada provincia. Se plantean un total de seis modelos, dos por cada una de las variables dependientes: tasa de mortalidad, tasa de heridos graves y tasa de heridos leves. Estas tasas se encuentran definidas por el número de víctimas dividido por millón de vehículos-kilómetro. Como variables independientes se incluyen las inversiones en construcción y el gasto en mantenimiento, durante el año de ejecución de los recursos y con retardos de uno y dos años. El resto de variables independientes hacen referencia a aspectos legislativos, socioeconómico y específicos de la red de carreteras. Los resultados muestran distinto comportamiento de las variables de recursos económicos invertidos en carreteras según el indicador de siniestralidad y según la renta de la provincia. De esta forma, la inversión en construcción aparece vinculada con reducciones en las cifras de mortalidad y heridos graves de las provincias con baja renta per cápita, aunque también muestra un efecto directo respecto a la mortalidad si se considera un retardo de un año. En provincias de alta renta per cápita, la inversión en construcción solo muestra una relación significativa de signo negativo respecto a las tasas de heridos graves y heridos leves. En cuanto al gasto en mantenimiento, solo obtiene resultados significativos respecto a la tasa de heridos leves, de signo negativo en provincias de rentas bajas para el año de ejecución y los dos anteriores, y de signo positivo en provincias de rentas altas con dos años de retardo.

Los resultados del estudio vinculan un mayor desarrollo económico, medido según la renta per cápita, con menores riesgos de sufrir accidentes. La tasa de desempleo, la introducción de un sistema de carnet por puntos, la intensidad media diaria de vehículos, la tasa de motorización, la proporción de vías de gran capacidad, el porcentaje de vehículos con más de diez años de antigüedad, el porcentaje de población mayor de 65 años y el nivel educativo, son factores relacionados con reducciones en las cifras de siniestralidad. Por otro lado, el turismo extranjero y la variación anual de población joven se relacionan de forma directa con algunos indicadores de siniestralidad.

Brzowska-Rup y Nowakowska (2020) evaluaron y compararon las tasas de siniestralidad vial de los 16 voivodatos, o provincias, de Polonia. Para ello, formularon modelos de datos de panel con efectos fijos por voivodato y año, cubriendo el periodo 2012-2018. Las tres tasas de siniestralidad utilizadas como variables dependientes se definieron en función de la cifra de interés (accidentes, fallecidos y heridos) dividida por cada 100 kilómetros de carretera. Como variables independientes, se incluyeron los recursos económicos destinados a carreteras, en función de la titularidad de éstas: nacionales y locales (pertenecientes a los voivodatos, comarcas y ayuntamientos). A su vez, las inversiones efectuadas en carreteras nacionales se desglosaron en: inversión en construcción, gasto en rehabilitación y gasto en mantenimiento. Adicionalmente, se incluyeron otras variables socioeconómicas y relativas a la composición de la infraestructura viaria: PIB per cápita, índice de urbanización, varias tasas de motorización, porcentaje de vías de gran capacidad y extensión de la red per cápita.

Los resultados de los tres modelos muestran una relación significativa de signo positivo para la inversión total realizada en las carreteras locales. Por otro lado, y para el caso de carreteras nacionales, solo se obtienen resultados significativos para el gasto en mantenimiento en el modelo de mortalidad, siendo su influencia de signo negativo. Las autoras indican que los resultados obtenidos no son los esperados en cuanto al signo positivo y a la falta de significancia general de las variables correspondientes a las carreteras nacionales. Justifican

que estos resultados inesperados pueden deberse tanto a la falta de desglose en los datos de inversión en carreteras locales como a no haber considerado ningún periodo de retardo en el efecto que puedan producir sobre la seguridad vial. Por otro lado, los condicionantes provinciales específicos, introducidos como variables ficticias, reflejan resultados significativos para doce o trece de los voivodatos, según la tasa de siniestralidad considerada. Representados del mismo modo, los efectos fijos anuales indican una disminución de las distintas tasas. El resto de variables independientes muestran una influencia distinta, en cuanto a signo de la relación y nivel de significancia, según el indicador de siniestralidad considerado.

Sánchez-González *et al.* (2021) analizaron los condicionantes regionales de Chile y su influencia sobre la seguridad vial, de forma similar al estudio realizado por los mismos autores en España (Sánchez González *et al.*, 2018). El estudio abarca las 13 regiones de Chile durante el periodo 2000-2017, de acuerdo a la división administrativa previa a la modificación de 2007. El análisis estadístico se realizó mediante el método de errores estándares corregidos para panel con efectos fijos, añadiendo una serie de variables ficticias que pretenden captar la influencia de los condicionantes propios de cada región. Como variables dependientes se utilizan cuatro indicadores de siniestralidad (fallecidos, heridos graves, heridos menos graves y heridos leves), expresados en función de dos medidas indirectas del nivel de exposición (número de vehículos y población). Los resultados no aclaran si hay un efecto beneficioso de las inversiones en carreteras sobre la seguridad vial. Por una parte, en los indicadores de siniestralidad expresados según población, tan solo obtiene resultados significativos la inversión en construcción, mostrando una relación directa con los heridos graves y leves. Por otro lado, en los indicadores expresados según vehículos, tanto la variable de construcción como la de gasto en mantenimiento obtienen resultados significativos, aunque con diferentes relaciones. La inversión en construcción muestra una relación directa con los heridos leves y el gasto en mantenimiento refleja una relación inversa con dos años de retardo respecto a las cifras de mortalidad, heridos graves, menos graves y leves, aunque en el caso de heridos graves también muestra una relación directa durante el año de ejecución del gasto. De forma general, los modelos formulados con los indicadores de severidad según población no obtienen apenas resultados significativos para las variables independientes consideradas. En cuanto a los modelos con la variable dependiente en función del número de vehículos, la reforma de la ley de circulación, la implantación de la ley de Tolerancia Cero y la variación anual de la densidad de población muestran un efecto reductor de la siniestralidad. Mientras que, por otro lado, la variación anual en la proporción de vías no pavimentadas y la proporción de vías de gran capacidad muestran una relación directa con el número de víctimas.

En líneas generales, y al igual que en el apartado 2.1, los estudios de ámbito nacional utilizan una estructura de datos de panel. No obstante, mientras que en la dimensión temporal también suele primar el uso de datos anuales, la dimensión transversal es ocupada, en esta ocasión, por algún tipo de unidad territorial propia del país en cuestión (provincias, regiones, etc.). Las únicas excepciones son los estudios de Aparicio Izquierdo *et al.* (2013) y Rojo *et al.* (2018), que utilizan datos agregados para todo el país y, además, Aparicio Izquierdo *et al.* (2013) utilizan una dimensión temporal mensual. Por otro lado, todos los estudios

seleccionados tienen en común que, al tratar de la seguridad vial en un solo país, se amplía considerablemente el espectro de variables incluidas en los mismos. De esta forma, además de los recursos económicos destinados a las carreteras, también se incluyen otra serie de variables relativas a: exposición al riesgo, características de la infraestructura viaria, socioeconómicas, demográficas, meteorológicas y legislativas. En la Tabla 2 se describen resumidamente dichos estudios, así como todas las variables consideradas. Dicha tabla se encuentra al final de este apartado.

La metodología utilizada en los estudios consultados a nivel nacional puede clasificarse en dos categorías amplias: estudios que formulan modelos para datos de recuento, como Fridstrøm e Ingebrigtsen (1991), Aparicio Izquierdo *et al.* (2013), Albalate *et al.* (2013) y Nguyen-Hoang y Yeung (2014); y estudios que formulan modelos de regresión lineal, como Houston *et al.* (1995), Sánchez González *et al.* (2018), Rojo *et al.* (2018), Sun *et al.* (2019), Sánchez González *et al.* (2020), Brzozowska-Rup y Nowakowska (2020) y Sánchez-González *et al.* (2021). Las particularidades de ambos enfoques metodológicos se expondrán en mayor detalle en el Capítulo 4. No obstante, es de resaltar que en los modelos para datos de recuento se utilizan las cifras de víctimas (fallecidos, heridos, etc.) como variable dependiente, mientras que en los modelos de regresión lineal se opta principalmente por una ratio (fallecidos por veh-km, heridos graves por vehículo, etc.).

Los recursos económicos aparecen desagregados, en su mayoría, según inversión destinada a la construcción y gasto destinado al mantenimiento. Esta distinción se encuentra en Fridstrøm e Ingebrigtsen (1991), Houston *et al.* (1995), Albalate *et al.* (2013), Sánchez González *et al.* (2018), Sánchez González *et al.* (2020), Brzozowska-Rup y Nowakowska (2020) y Sánchez-González *et al.* (2021). Otros estudios también consideran la inversión total de distintos modos: agregada al gasto en mantenimiento (Rojo *et al.*, 2018); junto a la inversión en construcción y el gasto en mantenimiento (Brzozowska-Rup y Nowakowska; 2020); junto al valor patrimonial estimado (Nguyen-Hoang y Yeung, 2014); o bien, como única variable de inversión Sun *et al.* (2019). Por su parte, Aparicio Izquierdo *et al.* (2013) solo consideran el gasto en mantenimiento.

Respecto a la influencia de las variables de recursos económicos destinados a las carreteras, el gasto en mantenimiento de carreteras aparece vinculado, más frecuentemente, a un efecto reductor de las cifras de siniestralidad (Fridstrøm e Ingebrigtsen, 1991; Houston *et al.*, 1995; Albalate *et al.*, 2013; Rojo *et al.*, 2018; Sánchez González *et al.*, 2018). Sin embargo, también se han llegado a obtener efectos contradictorios según el tipo de estudio o la severidad. Así, Aparicio Izquierdo *et al.* (2013) llegaron a vincular el gasto en mantenimiento por kilómetro con una reducción del número de accidentes. Sin embargo, la misma variable aparecía relacionada con un aumento en las cifras de accidentes mortales. Por otro lado, en un primer estudio abarcando las 50 provincias españolas, Sánchez González *et al.* (2018) hallaron una relación inversa entre el gasto en mantenimiento por kilómetro y los tres indicadores de seguridad considerados: fallecidos, heridos graves y heridos leves por millón de veh-km. No obstante, posteriormente en un estudio similar, y al considerar el nivel de desarrollo económico de la región de destino de las inversiones, Sánchez González *et al.* (2020) obtuvieron todo tipo de relaciones (inversa, directa o no significativa) con respecto a los mismos indicadores utilizados en el estudio anterior de 2018. Otra excepción es el estudio

realizado por Brzozowska-Rup y Nowakowska (2020) en los 16 voivodatos polacos. En este estudio, las autoras no encontraron ninguna relación estadísticamente significativa entre el gasto en mantenimiento de carreteras o el gasto en rehabilitación y las cifras de siniestralidad vial.

Respecto a la influencia de la inversión en construcción de carreteras sobre la seguridad vial, ocurre una situación similar a la del gasto en mantenimiento: existe un mayor número de estudios que han hallado una relación directa entre la inversión en construcción y el aumento de la siniestralidad, aunque la variedad de resultados no permite poder extraer una conclusión general. En concreto, tres estudios han encontrado exclusivamente una relación directa: Houston *et al.* (1995), Sánchez González *et al.* (2018) y Brzozowska-Rup y Nowakowska (2020). Otros tres estudios han encontrado diferentes relaciones y/o no significativas: Fridstrøm e Ingebrigtsen (1991), Sánchez González *et al.* (2020) y Sánchez-González *et al.* (2021). E incluso, Albalade *et al.* (2013) no encontraron una relación estadísticamente significativa. Por otro lado, cuando la inversión en construcción aparece agregada con el gasto en mantenimiento en una única variable de inversión total, ésta ha mostrado una relación inversa con las cifras de siniestralidad en 3 estudios (Nguyen-Hoang y Yeung (2014), Rojo *et al.* (2018) y Sun *et al.* (2019)) y una relación directa en un único estudio (Brzozowska-Rup y Nowakowska (2020)).

Así pues, las variables correspondientes a los recursos económicos destinados a carreteras muestran una considerable variabilidad en cuanto al signo de su influencia sobre las cifras de siniestralidad vial, tal y como puede observarse en la Tabla 2. Una posible explicación sobre esta variedad de resultados puede deberse a la simplificación que supone la modelización de un proceso complejo como el de los accidentes de tráfico. De hecho, dentro de la literatura de seguridad vial, la cantidad de factores considerados como explicativos es sustancialmente numerosa. No obstante, las variables utilizadas en estudios con modelos para datos de panel, y que cuentan con mayor número de evidencias, pueden clasificarse dentro de las siguientes categorías: relativas a la exposición al riesgo, a la infraestructura viaria o viario, socioeconómicas, meteorológicas y legislativas.

De los estudios analizados, cuatro de ellos consideran variables pertenecientes a todas las categorías de factores explicativos indicados: Aparicio Izquierdo *et al.* (2013), Nguyen-Hoang y Yeung (2014), Sánchez *et al.* (2018) y Sánchez González *et al.* (2020). Aun así, éstos presentan algunas características que no hacen posible la generalización de los resultados obtenidos en cuanto a las variables de inversión en carreteras. El estudio realizado por Aparicio Izquierdo *et al.* (2013) se diferencia principalmente de los otros tres en el sentido de que plantea un modelo global para todo el país, España, con una frecuencia de datos mensual, similar al enfoque utilizado previamente por Fridstrøm e Ingebrigtsen (1991). Por tanto, y ante la ausencia de datos mensuales del gasto en mantenimiento de carreteras, las cifras anuales son repartidas equitativamente entre los doce meses del año. Los autores señalan esto mismo como una limitación a la hora de interpretar los resultados contradictorios obtenidos. Por su parte, Nguyen-Hoang y Yeung (2014) utilizan dos variables que combinan la inversión en construcción y el gasto en mantenimiento, para separar los efectos a corto y largo plazo. No obstante, y a pesar del efecto beneficioso mostrados en la reducción de la mortalidad, no permite comparar los efectos independientemente de los recursos destinados

a la construcción de los destinados al mantenimiento. Otro aspecto que dificulta la comparabilidad de los resultados de inversión es el hecho de haber tomado el número total de fallecidos en cada estado, incluyendo ámbitos rural y urbano, mientras que los datos de inversión hacen referencia al ámbito rural. En cuanto a los dos últimos estudios, Sánchez *et al.* (2018) y Sánchez González *et al.* (2020), ambos consideran el mismo ámbito territorial y un periodo temporal muy parecido. No obstante, mientras que en el primer estudio (Sánchez *et al.*, 2018) los resultados parecen indicar, de forma generalizada, una relación de signo positivo para la inversión en construcción y de signo negativo para el gasto en mantenimiento, en el segundo estudio (Sánchez González *et al.*, 2020), donde se formulan modelos según el desarrollo económico de las provincias, los resultados no muestran una influencia homogénea de ninguna de estas variables, pudiendo aparecer con signo positivo, negativo o sin influencia estadísticamente significativa.

Como resumen de los estudios analizados en el presente apartado, se ha observado una gran variabilidad en cuanto a la relación entre los recursos económicos destinados a las carreteras y la seguridad vial. Esta variabilidad de resultados se ha manifestado tanto en el signo de la relación como en el nivel de significancia estadística de las variables consideradas en los estudios. Por otra parte, hay una serie de factores que limitan la comparabilidad de las conclusiones obtenidas en dichos estudios: i) distinto nivel de desagregación en los datos de inversión, reflejado, básicamente, en que no siempre se encuentran separados según inversión en construcción y gasto en mantenimiento; ii) inapropiada desagregación de las cifras de seguridad vial (que, además, deberían coincidir con el ámbito de destino de las inversiones en carreteras, lo cual no siempre ocurre) que suele ser rural o interurbano; iii) carencia de una medida de exposición al riesgo (considerada como una variable fundamental para poder hacer comparables las cifras de siniestralidad entre diferentes unidades territoriales y temporales); iv) falta de variables de control acerca de factores explicativos considerados en la literatura como influyentes. De lo anterior se deduce que no se puede extraer una conclusión general sobre la influencia de las inversiones en carreteras en la seguridad vial a nivel nacional y, por lo tanto, su estudio continúa siendo un tema de especial interés.

Tabla 2. Resumen de estudios nacionales que consideran los recursos económicos destinados a las carreteras

Artículo	País	Unidad territorial	Periodo	Metodología	Variable dependiente	Víctimas s/ámbito	Variable de recursos económicos destinados a carreteras	Otras variables independientes
Fridstrøm e Ingebrigtsen (1991)	Noruega	18 condados	1974-1986 (mensual)	DR: Regresión de Poisson	Accidentes mortales, accidentes con heridos, fallecidos, heridos, pasajeros heridos, peatones y ciclistas	No	Variación de la inversión en construcción por km (+/-), gasto en mantenimiento por km (-)	Ventas de gasolina, km. recorridos en transporte público, nieve, lluvia, horas de luz, extensión de la red de carreteras, notificación accidentes, inspección técnica de vehículos, vehículos registrados, conductores noveles, uso del cinturón de seguridad, ventas de bebidas alcohólicas
Houston <i>et al.</i> (1995)	EE.UU.	50 estados	1967-1991	RL: Método de Parks / modelos SUR con estructura AR	Fallecidos por veh-milla	No	Inversión en construcción per cápita (+), gasto en mantenimiento per cápita (-)	Gasto en policía de tráfico, densidad de población, proporción de jóvenes, consumo de alcohol, temperatura, renta per cápita, límites de velocidad, edad mínima legal para beber, normativa sobre el cinturón de seguridad
Aparicio Izquierdo <i>et al.</i> (2013)	España	1 país	1999-2004 (mensual)	DR: modelos DRAG	Accidentes mortales, accidentes con heridos	Sí	Gasto en mantenimiento por km (+/-)	Veh-km recorridos, proporción de vehículos pesados, proporción de vías de gran capacidad, días nublados, días con nevadas, precipitación, temperatura, porcentaje de conductores noveles, tasa de desempleo, días festivos, vehículos antiguos, vehículos con ABS, controles de alcoholemia, suspensiones de permisos de conducción, normativa de circulación, reducción de la tasa de alcohol permitida

Artículo	País	Unidad territorial	Periodo	Metodología	Variable dependiente	Víctimas s/ámbito	Variable de recursos económicos destinados a carreteras	Otras variables independientes
Albalate <i>et al.</i> (2013)	España	50 provincias	1990-2010	DR: Regresión binomial negativa con efectos fijos	Fallecidos, víctimas totales	Sí	Inversión en construcción per cápita (#), gasto en mantenimiento per cápita (-)	Proporción de vías de gran capacidad, proporción de carreteras según ancho de calzada, tasa de motorización, tasa de desempleo, proporción de personas mayores, médicos per cápita, normativa de circulación, subvenciones para renovación de coches, programa de acción europeo de seguridad vial 1997-2001, programa de acción europea de seguridad vial 2003-2010, reforma de normativa de circulación
Nguyen-Hoang y Yeung (2014)	EE.UU.	50 estados	1980-2010	DR: Regresión binomial negativa con efectos fijos	Fallecidos	No	Valor patrimonial estimado per cápita (-), inversión total per cápita (-)	Veh-milla, extensión de red, conductores per cápita, proporción de vehículos pesados, tasa de motorización, normativa de cinturón de seguridad, límite de velocidad, normativa de sistemas de retención infantil, mínima edad legal para comprar cerveza, precio de la gasolina, precipitación, temperatura, renta per cápita, tasa de desempleo, densidad de población
Sánchez González <i>et al.</i> (2018)	España	50 provincias	1999-2015	RL: Método de errores estándar corregidos para datos de panel con estructura AR	Fallecidos, heridos graves, heridos leves por veh-km	Sí	Inversión en construcción por kilómetro (+), gasto en mantenimiento por km (-)	Intensidad de tráfico, proporción de vías de gran capacidad, tasa de motorización densidad de población, tasa de desempleo, precipitación, sistema de carnet por puntos

Artículo	País	Unidad territorial	Periodo	Metodología	Variable dependiente	Víctimas s/ámbito	Variable de recursos económicos destinados a carreteras	Otras variables independientes
Rojo <i>et al.</i> (2018)	España	1 país	2009-2014	RL: Regresión lineal simple	Accidentes por veh-km, fallecidos por veh-km, fallecidos por cien accidentes	No	Inversión total (-), gasto en mantenimiento (-)	—
Sun <i>et al.</i> (2019)	China	31 provincias y ciudades	2004-2016	RL: Regresión con efectos fijos	Víctimas totales	No	Inversión total (-)	PIB, extensión de la red, incremento de población, nuevos propietarios de vehículos
Sánchez González <i>et al.</i> (2020)	España	50 provincias	1999-2020	RL: Método de errores estándar corregidos para datos de panel con estructura autorregresiva	Fallecidos/heridos graves/heridos leves por veh-km	Sí	Inversión en construcción por kilómetro (#/+/-), Gasto en mantenimiento por km (#/+/-)	Renta per cápita, sistema de carnet por puntos, intensidad de tráfico, tasa de motorización, densidad de población, tasa de desempleo, precipitación, proporción de vías de gran capacidad, turistas extranjeros, vehículos antiguos, proporción de jóvenes, proporción de mayores, nivel de educación
Brzowska-Rup and Nowakowska (2020)	Polonia	16 voivodatos	2012-2018	RL: Regresión con efectos fijos	Fallecidos/heridos /accidentes por km	No	Inversión total por km (+), Inversión en construcción por km (+), gasto en rehabilitación por km (#), gasto en mantenimiento por km (#)	Renta per cápita, índice de urbanización, tasa de motorización, tasa de motorización de motocicletas, proporción de vías de gran capacidad, extensión de la red per cápita
Sánchez-González <i>et al.</i> (2021)	Chile	13 regiones	2000-2017	RL: Método de errores estándar corregidos para datos de panel	Fallecidos/Heridos graves/Heridos menos graves/Heridos graves	Sí	Inversión en construcción por kilómetro (#/+), gasto en mantenimiento por km (#/+/-)	Proporción de vías de gran capacidad, proporción de vías no pavimentadas, precipitación, tasa de desempleo, densidad de población, tasa de

Artículo	País	Unidad territorial	Periodo	Metodología	Variable dependiente	Víctimas s/ámbito	Variable de recursos económicos destinados a carreteras	Otras variables independientes
				con estructura autorregresiva	leves por vehículo, y per cápita			motorización, ley de tránsito, reducción de la tasa de alcohol permitida

Notas: RL: Regresión lineal; DR: Datos de recuento/Regresión lineal generalizada.

** (+), relación directa; (-), relación inversa; (#), relación estadísticamente no significativa.

2.3 ESTUDIOS DE SEGURIDAD VIAL PARA V2RM

Durante la revisión de la bibliografía realizada en los subapartados 2.1 y 2.2, se detectó una carencia de estudios que analizasen la posible influencia de los recursos económicos destinados a las carreteras en los accidentes de motocicletas y/o ciclomotores, también denominados como V2RM⁵. Hay que tener en cuenta que, en los últimos años se ha incrementado el uso de este tipo de vehículos de forma generalizada en todo el mundo, y España no es una excepción. Puesto que los usuarios de motocicletas son especialmente vulnerables ante los accidentes, el análisis de factores que pueden influir en ellos se ha convertido en un foco de atención en multitud de programas y estrategias de seguridad vial. Según el Parlamento Europeo (2014), los motociclistas son más susceptibles que otros usuarios de la vía ante los peligros y dificultades derivados tanto del diseño y construcción de la carretera, como del mantenimiento y estado del pavimento de la misma. Van Elslande y Elvik (2012) señalaban que los motoristas tienen mayor dificultad para mantener el control de su vehículo ante alteraciones en la carretera que pueden pasar inadvertidas para los conductores de automóviles. Del mismo modo, y esta vez para conocer el punto de vista de los motociclistas, Delhay y Marot (2015) realizaron una encuesta a motociclistas de dieciocho países europeos, en la cual los encuestados señalaron la propia carretera como una de sus principales preocupaciones respecto al riesgo de sufrir un accidente. Por otro lado, diversas investigaciones como las de European Association of Motorcycle Manufacturers (ACEM) (2009), Allen *et al.* (2017) y Brown *et al.* (2021), también han encontrado evidencias de que algunos condicionantes de la carretera (falta de visibilidad en intersecciones, presencia de objetos fijos, señalización vertical inexistente, etc.) tienen una gran influencia en los accidentes de motos. No obstante, y a pesar de estas evidencias acerca de que los condicionantes de la carretera afectan relativamente más a los usuarios de V2RM, no se han encontrado estudios que analicen la relación potencial entre los recursos económicos dedicados a carreteras y los accidentes de V2RM. Por ello, en la presente tesis doctoral se pretende también cubrir este vacío de conocimiento.

Por otro lado, según Yannis *et al.* (2010), la investigación acerca de diversos factores de riesgo para los motociclistas ha estado limitada, en gran medida, por la escasez de datos de exposición al riesgo (relativos al tráfico) específicos para este tipo de vehículos. En una revisión sobre factores críticos de riesgo para motocicletas, Vlahogianni *et al.* (2012) resaltaban la insuficiencia de estudios sobre factores de riesgo asociados a la infraestructura y que esta carencia se derivaba de la escasez de datos de exposición relativos a V2RM, por lo que la extracción de conclusiones sobre el riesgo de accidentes de motocicletas se veía comprometida. Debido a ello, los autores señalaban la necesidad de incluir datos de exposición específicos para motocicletas en los

⁵ El término *Vehículos de Dos Ruedas Motorizados* (V2RM) es equivalente al acrónimo utilizado en la literatura inglesa como PTW. Este término incluye tanto a motocicletas como a ciclomotores de dos ruedas, considerándose a los ciclomotores como el primer segmento cilíndrico de las motocicletas.

estudios de accidentes, apuntando a esta necesidad, además, como uno de los grandes retos a los que se enfrenta la literatura de accidentes de V2RM.

Por tanto, y ante la falta de estudios previos que consideren la influencia de los recursos económicos dedicados a carreteras, en este subapartado se describirán aquellos estudios previos que al menos incluyen alguna medida de exposición al riesgo específica para V2RM. Por otra parte, al final de este apartado se muestra en la Tabla 3 un resumen de los estudios revisados.

En primer lugar, y a raíz de la dificultad comentada anteriormente, la propia obtención de datos relativos a la exposición de motocicletas ha sido en sí misma un tema de estudio en la literatura de accidentes de motos. Consecuentemente, la mayoría de estos estudios se pueden describir como estudios de comparación de riesgo, en los cuales se pretende hacer comparables las cifras de siniestralidad entre distintos grupos de usuarios de la carretera, y para los cuales es necesario disponer de una medida de exposición al riesgo homogénea. Así pues, con el fin de obtener la exposición específica de los V2RM se utilizan diversas fuentes de datos: encuestas a usuarios de V2RM (de Rome *et al.*, 2016; Harrison y Christie, 2005), datos de la inspección técnica de motocicletas (Keall y Newstead, 2012), estimación a partir de encuestas domiciliarias de movilidad (Beck *et al.*, 2007; Blaizot *et al.*, 2013; Bouaoun *et al.*, 2015; Licaj *et al.*, 2011), publicaciones oficiales de ministerios de transportes u oficinas estadísticas (Stipdonk y Berends, 2008), o extracción mediante el método de exposición cuasi-inducida (Haque *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2018). Se describen a continuación estos estudios.

Harrison y Christie (2005) realizaron dos encuestas postales a 794 conductores de motos del estado de Nueva Gales del Sur, en Australia, con un tiempo de separación entre sí de seis meses. Una cuestión clave en estas encuestas eran las lecturas de los odómetros de las motocicletas, ya que el cálculo de la exposición se estimó a través de estas medidas. Por otro lado, los encuestados también respondieron sobre su posible implicación en algún accidente de tráfico en los últimos cinco años, además de otras cuestiones sobre características de su vehículo o patrones de conducción. Con estos datos, los autores pudieron establecer una tasa media de riesgo de accidente de 0,96 por 100.000 km recorridos, viéndose ésta disminuida a medida que avanza la edad de los conductores. Por su parte, De Rome *et al.* (2016) enviaron una encuesta en la que se preguntaba directamente sobre las horas y kilómetros recorridos por semana, los años de experiencia y la frecuencia de conducción en diferentes entornos y condiciones. Los autores contaron con un total de 506 participantes también del estado de Nueva Gales del Sur, en Australia. Como resultados destacados, el estudio señalaba mayores tasas de exposición en kilómetros recorridos para el grupo de conductores más joven, entre 15 y 19 años, a la vez que este grupo era el que informó de una menor implicación en accidentes, pero el que más veces se había encontrado en una situación cercana a sufrir uno (el 80% de los encuestados pertenecientes a esta franja de edad).

Otro enfoque para obtener una medida directa de la exposición al riesgo es el utilizado por Keall y Newstead (2012). Para obtener las lecturas de los odómetros de motocicletas y turismos, los autores extrajeron datos a partir de los registros del sistema de inspección técnica de vehículos

de Nueva Zelanda, vinculando estos registros con los de las bases de datos de accidentes. De esta forma pudieron comprobar las tasas de riesgo de turismos y motocicletas, usando además otros indicadores como el género, la edad, el tipo de moto y el ámbito (urbano o rural). Como resultado principal se destacó un mayor riesgo de sufrir un accidente para los motoristas que para los conductores de turismos, mostrándose este riesgo especialmente elevado en motoristas veinteañeros.

Por otro lado, las encuestas domiciliarias de movilidad suelen ser una buena fuente para extraer la exposición según modo de transporte, a través de preguntas directas. Así, Beck *et al.* (2007) utilizaron la encuesta domiciliaria nacional de movilidad de EE.UU. de 2001 para estimar la exposición, como viajes-persona, durante su periodo de estudio, entre 1999 y 2003. Los autores resaltaron que, a pesar de suponer tan solo el 0,1% de todos los viajes, la tasa de riesgo de sufrir un accidente, tanto mortal como con lesiones, excedía con creces a las de cualquier otro usuario de la vía (turismos, peatones, ciclistas, autobuses y otros vehículos). De forma similar, Bouaoun *et al.* (2015) usaron la encuesta domiciliaria nacional de movilidad, realizada en Francia durante el 2007/08, para estimar varias medidas de exposición (viajeros-km, viajes/persona y viajeros-hora), y de las cuales se servirían para calcular distintas tasas de riesgo por modo de transporte, desagregando también por género y edad. Al considerar la exposición, los autores destacaron que la tasa de riesgo de las motocicletas era extremadamente alta si se comparaba con otros usuarios de la vía, concretamente, de 20 a 32 veces superior que la correspondiente a los conductores de coches. Por otra parte, tanto Blaizot *et al.* (2013) como Licaj *et al.* (2011) emplearon encuestas domiciliarias regionales de movilidad para estimar la exposición de distintos modos de transporte en el departamento de Rhône (Francia). Blaizot *et al.* (2013) calcularon las tasas de riesgo entre 2005 y 2006 para diversos usuarios de la vía (turismos, peatones, ciclistas y motociclistas), varios tipos de severidad (total de heridos, hospitalizaciones, heridos graves, fallecidos) y según varios indicadores de exposición (viajeros-km, viajes/persona, horas/persona) derivados de la encuesta regional realizada en 2005/06, corrigiendo, además, la estacionalidad utilizando la encuesta de 2007/07. Las tasas de riesgo calculadas, en todos los indicadores de severidad, reflejaban unas cifras muy superiores para los motoristas que para cualquier otro tipo de usuarios: por ejemplo, la tasa de accidentes con lesiones era de 14,88 por cada millón de kilómetros, mientras que la misma tasa era de 11,30 para ciclistas, 1,29 para peatones y 0,48 para conductores de coches. Los autores también pusieron de manifiesto la importancia de considerar tasas de siniestralidad vial en función de la exposición a la hora de evaluar y monitorizar políticas y objetivos específicos de seguridad vial. Licaj *et al.* (2011) también utilizaron la encuesta regional de 2005/06 para estimar la exposición de los usuarios más jóvenes por modo de transporte y por kilómetros recorridos, aunque en esta ocasión también se buscaba establecer una comparación entre las tasas de riesgo de los jóvenes pertenecientes a zonas socioeconómicamente deprimidas y los de otras zonas. Los resultados mostraron una incidencia de siniestralidad por kilómetro recorrido en motocicleta de 6,83 veces superior para los jóvenes de 18 a 24 años residentes en zonas deprimidas, comparada con la correspondiente a zonas socioeconómicamente no deprimidas.

Por su parte, Stipdonk y Berends (2008) utilizaron los datos de movilidad publicados por la agencia nacional de estadística de Países Bajos, los cuales se encontraban en ámbito nacional y desagregados según clase de vehículo: turismo, motocicleta y camión. Adicionalmente, también utilizaron datos sobre la distancia recorrida por persona obtenidos a través de encuestas domiciliarias, publicados por el ministerio de transportes. Con estos datos, los autores pudieron establecer distintas tasas de riesgo en función del usuario de la vía. Un resultado destacable es que el riesgo para motoristas se halló 13 veces superior al de los conductores de turismo, y que esta diferencia de riesgo se mantuvo prácticamente constante durante 55 años.

En algunas ocasiones se ha recurrido al método de exposición cuasi-inducida para estimar la exposición relativa de las motocicletas con respecto a otros usuarios, como en Haque *et al.*, 2012 y Wu *et al.* (2018) . Este método se aplica generalmente a colisiones entre varios vehículos, ya que está basado en la hipótesis de que el vehículo no responsable del accidente equivale a una muestra aleatoria de la población total, por lo que establecer la correcta responsabilidad del accidente es una condición fundamental para esta técnica. Haque *et al.* (2012) utilizaron este método para investigar los accidentes de motocicletas ocurridos en Singapur durante los cinco años comprendidos entre 2004 y 2008. Los resultados mostraron que el riesgo relativo para los motociclistas aumentaba especialmente en las maniobras de incorporación y salida de vías de gran capacidad, mientras que, por otro lado, los motociclistas mostraron mayor precaución ante la presencia de pavimento mojado, especialmente durante la noche. Por su parte, Wu *et al.* (2018) utilizaron la misma técnica para investigar factores de riesgo asociados a accidentes por pérdida de control en Francia en 2011. Considerando un estudio de control de casos con 903 accidentes, los autores pudieron establecer que una mala adhesión con la carretera incrementaba el riesgo de perder el control de la moto. Además, si esta mala adhesión aparecía de forma imprevista (cambio de textura de la señalización horizontal, baches, etc.) el riesgo se incrementaba más de veinte veces.

Resumiendo, a pesar de que las tasas de riesgo mostradas en estos estudios pueden variar en función del nivel de exposición y del indicador de siniestralidad seleccionados, se observan unos resultados homogéneos en términos de peligrosidad que sitúan a las motocicletas como el modo de transporte más expuesto. Así, las cifras oscilan desde una tasa de riesgo de accidente 3,3 veces superior (Keall y Newstead, 2012) hasta una tasa de mortalidad 32 veces superior (Bouaoun *et al.*, 2015). Por otro lado, tan solo dos referencias consideran algún condicionante de la carretera (por ejemplo: la superficie de rodadura, la señalización presente en las intersección o tipo de alineación de la carretera) como factor explicativo —Haque *et al.* (2012) y Wu *et al.* (2018)— aunque estos estudios no parten de datos propiamente de exposición para motocicletas, sino que calculan razones de probabilidades mediante el método de exposición cuasi-inducida (Stamatiadis y Deacon, 1997), a partir de los cuales, se puede establecer un riesgo relativo en los análisis categóricos. De esta forma, algunos condicionantes de la carretera aparecen vinculados con la seguridad de las motocicletas, por ejemplo: Haque *et al.* (2012) estimaron un riesgo de accidente 11,9 veces superior en intersecciones sin señalizar respecto al equivalente con señalización, y Wu *et al.* (2018) identificaron un riesgo de perder el control de la motocicleta 20

veces mayor cuando la pérdida de adhesión con la carretera se presentaba de forma imprevista. Por lo tanto, puede extraerse una conclusión clara de estos estudios de comparación de riesgo: el riesgo correspondiente a los usuarios de motocicletas es muy superior al de los conductores de coches u otro tipo de vehículos.

Dejando de lado los estudios de comparación de riesgo, y considerando los estudios revisados que incorporan medidas de exposición, solo tres de ellos plantean modelos estadísticos que consideren las variaciones anuales de la siniestralidad y del tráfico: Harnen *et al.* (2003), Rolison *et al.* (2013) y Abdul Manan *et al.* (2013). Estos estudios se diferencian de aquellos de comparación de riesgo en que pretenden identificar y cuantificar, de forma específica para los motoristas, qué factores influyen sobre las tasas de siniestralidad vial. Para ello, el enfoque estadístico utilizado en los tres casos se basa en la formulación de modelos de regresión para datos de recuento. Concretamente, los tres estudios utilizan una regresión binomial negativa, aunque Harnen *et al.* (2003) también usan un modelo de Poisson. A pesar de incluir todos ellos alguna variable de tráfico específica para motocicletas, la medida considerada de exposición al riesgo en cada estudio puede variar según el ámbito de análisis (Hakkert y Braimaister, 2002). Así, Harnen *et al.* (2003) utilizan el tiempo como variable de exposición al riesgo por tratarse de un estudio en un tipo de localización concreta —intersecciones urbanas en Selengor (Malaysia)—, definiendo la variable dependiente como el número de accidentes por año. A su vez, el volumen de tráfico (tanto para motocicletas como para el resto de vehículos) lo incorporan como variable independiente. Otras variables independientes incluidas como potenciales factores explicativos fueron: el flujo peatonal por hora, la velocidad de aproximación a la intersección, el ancho de carril, el número de carriles, el tipo de intersección, la anchura de arcén y la categoría urbanística del suelo. Los resultados mostraron una relación directa para las variables de flujo peatonal y de velocidad de aproximación, mientras que otras variables relacionadas con los condicionantes de la carretera —ancho de carril, anchura de arcén y número de carriles— reflejaron un efecto reductor de la tasa de accidentes. De forma similar, Abdul Manan *et al.* (2013) investigaron los accidentes mortales ocurridos durante un período de tres años, entre 2007 y 2009, en tres estados de Malasia. El ámbito de análisis fue una selección de 124 tramos de carretera de aquellos estados, por lo que utilizaron la longitud de tramo como medida de exposición al riesgo, definiéndose así la variable dependiente como el número de fallecidos por kilómetro. Por otro lado, el volumen de tráfico de las motocicletas era añadido como variable explicativa, junto a otras relacionadas con condicionantes de la carretera —número de accesos, de curvas y de intersecciones— y con el tipo de calificación urbanística por la que transcurre el tramo. Los resultados de este estudio solo mostraron una influencia significativa de signo positivo para las variables de intensidad media diaria de tráfico de motocicletas y para el número de accesos por kilómetro. Por otro lado, Rolison *et al.* (2013) estudiaron la siniestralidad vial entre la población joven de Gran Bretaña, comparando las tasas de riesgo de los conductores de motocicletas de gran cilindrada (superior a 125 cc) y las de los conductores de turismos durante el periodo comprendido entre 2002 y 2009. En su análisis, ajustaron el riesgo para cada tipo de usuario mediante el uso, como medida de exposición, de la cantidad de viajes-persona realizados. Los resultados ponían de manifiesto un riesgo de mortalidad para los jóvenes motoristas 76,32 veces superior al de los conductores

de coches, y un riesgo de sufrir un accidente con lesiones 27,66 veces superior. Por otro lado, estas tasas se iban atenuando a medida que avanzaba la edad, tanto para motoristas como para conductores de turismos.

Como resumen general de este apartado, se ha constatado la escasez de estudios que consideran alguna medida de exposición específica para motocicletas. Además, y debido a la falta de datos de exposición (Vlahogianni *et al.*, 2012; Yannis *et al.*, 2010), uno de los objetivos de la literatura ha sido la obtención de aquellos datos y su uso para calcular tasas de riesgo con las que poder establecer comparaciones entre modos de transporte (y, entre ellos, considerando las motos). De forma homogénea en todos los estudios comparativos, se alcanzan conclusiones similares: la tasa de riesgo es mucho más elevada para las motocicletas que para cualquier otro vehículo. Por otro lado, y a pesar de haberse demostrado esta especial vulnerabilidad de los motoristas, apenas tres estudios que consideran la exposición han considerado otros posibles factores de influencia en las tasas de siniestralidad mediante modelos de regresión. Con todo ello, y junto con la edad, también se han vinculado ciertos condicionantes de la carretera —como la anchura de arcén o el número de accesos— con las tasas de riesgo. No obstante, todavía quedan por analizar multitud de posibles factores influyentes en la seguridad vial de los motociclistas, entre los que se encuentran los recursos económicos destinados a las carreteras, por lo que la presente Tesis Doctoral va a contribuir en la investigación de estos factores.

Tabla 3. Resumen de estudios sobre V2RM que consideran medidas de exposición al riesgo específicas para el tráfico o distancia recorrida.

Artículo	Ámbito	Período	Metodología de análisis*	Índice de Riesgo comparado según	Variable dependiente	Variab ^{les} independientes	Medida de exposición (V2RM)	Fuente de datos de exposición o tráfico
Harnen <i>et al.</i> (2003)	53 intersecciones urbanas de Selangor, Malasia	1997-2000	MR: Regresión de Poisson/Binomial negativa	-	Accidentes por año	Intensidad Media Diaria (IMD) de motocicletas, IMD de resto de vehículos, flujo peatonal, velocidad, ancho de carril, número de carriles, tipo de intersección, ancho de arcén, categoría urbanística del suelo	Año	Autoridad de Carreteras de Malasia, Ministerio de Obras
Harrison y Christie (2005)	794 motoristas de Nueva Gales del Sur, Australia	2002-2003	CIR	Género, edad, lugar de residencia, tamaño del motor, tipo de motocicleta	-	-	Veh-km	Lecturas del odómetro
Beck <i>et al.</i> (2007)	Estados Unidos	1999-2003	CIR	Severidad, género, edad, usuario de la vía	-	-	Viajes/persona	Encuesta Domiciliaria Nacional de Movilidad (2001)
Stipdonk y Berends (2008)	Países Bajos	1950-2000	CIR	Usuario de la vía	-	-	Veh-km	Oficina nacional de estadística (CBS) y Ministerio de Transportes
Licaj <i>et al.</i> (2011)	Región de Ródano, Francia	2005-2006	CIR	Género, edad, usuario de la vía, localización	-	-	Viajeros-km, miles de habitantes	Encuesta Domiciliaria de

Artículo	Ámbito	Período	Metodología de análisis*	Índice de Riesgo comparado según	Variable dependiente	Variables independientes	Medida de exposición (V2RM)	Fuente de datos de exposición o tráfico
				urbana/rural, caracterización socioeconómica			jóvenes, miles de usuarios por modo	Movilidad de Lyon (2005/06)
Haque <i>et al.</i> (2012)	Singapur	2004-2008	CIR-MR: Log-linear	Localización urbana/rural	Accidentes por colisión entre vehículos	Road surface, time of day, lane position, speed limit, intersection type, traffic configuration	Casos en los que el conductor no tiene la culpa (exposición cuasi-inducida)	Base de datos de accidentes del Departamento de Policía de Tráfico de Singapur
Keall y Newstead (2012)	Nueva Zelanda	2005-2006	CIR	Género, edad, localización urbana/rural	-	-	Veh-km	Registro de vehículos de motor, Agencia de Transporte de Nueva Zelanda
Abdul Manan <i>et al.</i> (2013)	124 tramos de carretera de tres estados de Malasia	2007-2009	MR: Regresión binomial negativa	-	Fallecidos por kilómetro	IMD de motocicletas, IMD total, número de accesos, número de curvas, configuración de carriles, mediana, arcén pavimentado	Longitud de tramo	Autoridad de Carreteras de Malasia, Ministerio de Obras
Blaizot <i>et al.</i> (2013)	Región de Ródano, Francia	1996-1997, 2005-2006	CIR	Género, edad, usuario de la vía, localización urbana/rural	-	-	Viajeros-km, viajes/persona,	Encuesta Domiciliaria Regional de Movilidad (1994/95, 2005,06)

Capítulo 2: ESTADO DEL ARTE

Artículo	Ámbito	Período	Metodología de análisis*	Índice de Riesgo comparado según	Variable dependiente	Variables independientes	Medida de exposición (V2RM)	Fuente de datos de exposición o tráfico
Rolison <i>et al.</i> (2013)	Reino Unido	2002-2009	MR: Regresión binomial negativa	-	Fallecidos por viaje, víctimas no mortales por viaje	Edad, capacidad del motor	Viajes/persona	Departamento de Transporte de Reino Unido
Bouaoun <i>et al.</i> (2015)	Francia	2007-2008	CIR	Género, edad, usuario de la vía	-	-	Viajeros-km, viajes/persona, viajeros-hora	Encuesta Domiciliaria Nacional de Movilidad (2007/08)
De Rome <i>et al.</i> (2016)	506 motoristas de Nueva Gales del Sur, Australia	2012 (4 semanas)	CIR	Edad	-	Infracciones de tráfico, puntos perdidos del carnet, infracciones relacionadas con el alcohol, infracciones relacionadas con la velocidad	Veh-km, horas-conducidas, años de experiencia, frecuencia según ámbito de conducción	Encuestas a los participantes
Wu <i>et al.</i> (2018)	Francia	2011	CIR-MR: Regresiones logísticas univariante y multivariante	-	Accidentes por pérdida de control	Tipo de alineación, estado del pavimento, tasa de alcohol en sangre, tipo de motocicleta, tipo de día, velocidad	Casos en los que el conductor no tiene la culpa (exposición cuasi-inducida)	Base de datos del proyecto VOIESUR

Nota: CIR: Comparación de Índice de Riesgo, MR: Modelo de Regresión

2.4 CONCLUSIONES SOBRE EL ESTADO DEL ARTE

El apartado 2.1 ha partido desde el ámbito internacional con el fin de evaluar enfoques socioeconómicos afines, así como identificar los principales indicadores y metodologías estadísticas empleados. Por otro lado, el apartado 2.2, de ámbito nacional, se centra en estudios que integran algunas variables de inversión en carreteras como factores explicativos de distintos indicadores de seguridad vial. Y, por último, el apartado 2.3 orienta la revisión del estado del arte hacia unos usuarios vulnerables de la carretera: los V2RM.

Para terminar, se incluyen a continuación las conclusiones del estado del arte, articuladas en torno a las principales carencias detectadas (Ci):

- C1. No existen estudios que hayan analizado, a nivel internacional, el efecto de los recursos económicos dedicados a las carreteras sobre la seguridad vial. Esta carencia es especialmente preocupante si se tiene en cuenta la disparidad de los resultados obtenidos en estudios realizados en un ámbito nacional que sí consideran dichas variables;
- C2. La literatura existente no ha indagado sobre las posibles razones por las cuales el efecto de los recursos económicos dedicados a carreteras sobre la seguridad vial es distinto en unos entornos socioeconómicos que en otros. Tan solo el estudio realizado por Sánchez González et al. (2020) en España plantea la existencia de ciertas desigualdades regionales entre provincias con distinto nivel de renta per cápita. No obstante, los resultados del estudio no llegan a mostrar un resultado homogéneo y estadísticamente significativo para estas variables de recursos económicos, especialmente si se consideran los resultados como una continuación del estudio previo similar realizado por los mismos autores (Sánchez González et al., 2018). En un sentido más amplio, Law (2015) sí encontró una relación en forma de U invertida entre el crecimiento económico y las cifras de siniestralidad vial a lo largo del tiempo. Por ello, la posible existencia de un efecto similar para la inversión en construcción y/o el gasto en mantenimiento según el nivel económico de un país es un campo de estudio sin abordar y que puede contribuir a arrojar conocimiento sobre esta cuestión;
- C3. En los estudios de ámbito nacional que sí consideran variables relativas a los recursos económicos destinados a carreteras se han identificado adicionalmente ciertos factores explicativos que han mostrado relevancia estadística. Estos factores se pueden agrupar en cinco grandes bloques: exposición al riesgo, infraestructura viaria, socioeconomía, demografía, condiciones meteorológicas y legislación. No obstante, dentro de la literatura existente, tan sólo algunos estudios (Aparicio Izquierdo et al., 2013; Nguyen-Hoang y Yeung, 2014; Sánchez González et al., 2020, 2018) contemplan variables de control correspondientes a los cinco bloques;

- C4. Ninguno de los estudios revisados en este capítulo contempla el análisis de la influencia de los recursos económicos destinados a las carreteras en la siniestralidad de V2RM. Los trabajos de referencia consideran el conjunto de todos los usuarios de la vía para formular sus indicadores de seguridad vial. Sin embargo, los V2RM son más vulnerables que otros usuarios de la carretera ante dificultados y peligros causados por el diseño, la construcción, el mantenimiento y las condiciones de la vía (European Parliament: DG for Internal Policies, 2014). En este aspecto, los recursos económicos destinados a las carreteras se pueden entender como una aproximación a los condicionantes de la infraestructura, ya que su objetivo final consiste en crear o modificar la misma. Por tanto, el estudio sobre su influencia sobre la siniestralidad de motocicletas es un tema de especial trascendencia que todavía no ha sido investigado;
- C5. La disponibilidad de datos de exposición al riesgo es el principal factor limitante a la hora de formular modelos estadísticos de siniestralidad de motocicletas. De hecho, solo se han encontrado tres casos que incluyan el tráfico específico de V2RM en sus modelos de siniestralidad para este tipo de usuarios: Harnen et al. (2003), Rolison et al. (2013) y Abdul Manan et al. (2013). A su vez, los tres estudios plantean modelos de regresión binomial negativa para sus análisis. Si bien es un enfoque estadístico ampliamente utilizado para tratar temas de seguridad vial (Anastasopoulos y Mannering , 2009), la literatura reciente ha avanzado notablemente en la incorporación de la heterogeneidad no observada a este tipo de modelos, tal y como indican Lord y Mannering (2010) y Mannering et al. (2016). Por ello, la ausencia de estudios que incorporen el tráfico específico de motocicletas y realicen una comparación entre diversas configuraciones de modelos de regresión binomial negativa supone, a día de hoy, un vacío de conocimiento reseñable.

CAPÍTULO 3.

OBJETIVOS

Capítulo 3:

3 OBJETIVOS

La revisión del estado del arte ha puesto de manifiesto una serie de carencias existentes en la literatura previa que requieren ser tratadas con el fin de avanzar en el conocimiento sobre la posible relación entre inversiones en carreteras y seguridad vial. Conforme a ello, en este capítulo se detallan los objetivos perseguidos por el presente trabajo de investigación desarrollados a partir de dichas carencias. Primero, el apartado 3.1 expone el objetivo principal de la tesis. Seguidamente, el apartado 3.2 desglosa los objetivos específicos. Y, por último, el apartado 3.3 enumera las hipótesis planteadas.

3.1 OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de la tesis doctoral consiste en analizar la influencia de los recursos económicos dedicados a las carreteras sobre diversos indicadores de exposición al riesgo de la seguridad vial, abarcando dos ámbitos de estudio: Europa y España. Asimismo, debido a que los recursos económicos dedicados a la infraestructura viaria suelen clasificarse según su naturaleza en dos categorías, inversión en construcción y gasto en mantenimiento, se

investigará la influencia de cada una de ellas sobre las cifras de siniestralidad vial de forma independiente.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El objetivo principal expuesto anteriormente se desarrolla y concreta a través de los siguientes objetivos específicos (O_i), vinculados a las carencias (C_i) detectadas en la revisión del estado del arte:

- O1. Partiendo de la carencia C1, el **primer objetivo específico (O1)** consiste en verificar la existencia de una relación general, a nivel internacional para el máximo número de países, entre los recursos económicos destinados a carreteras —relativos a la construcción y al mantenimiento— y los indicadores de seguridad vial;
- O2. Adicionalmente, en base a la carencia C1 y a la heterogeneidad de resultados resaltada en la carencia C2, el **segundo objetivo específico (O2)** pretende determinar qué tipo de influencia ejercen los recursos económicos dedicados a carreteras sobre la seguridad vial a nivel internacional: beneficiosa, perjudicial o inexistente;
- O3. Motivado también por la carencia C2, el **tercer objetivo específico (O3)** propone identificar si la influencia de los recursos económicos destinados a las carreteras está condicionada por el nivel de desarrollo económico del ámbito de estudio;
- O4. El **cuarto objetivo específico (O4)** pretende analizar, junto con los recursos económicos, la influencia de una serie de variables adicionales —socioeconómicas, relacionadas con la red de carreteras, con el tráfico, con la meteorología y de carácter legislativo— en la seguridad vial. Este objetivo se relaciona con la carencia C3;
- O5. El **quinto objetivo específico (O5)** plantea analizar el efecto de las inversiones sobre los accidentes de un tipo concreto de usuarios, los motociclistas, como respuesta a la carencia C4;
- O6. Por último, y derivado de la carencia C5, el **sexto objetivo específico (O6)** pretende avanzar en el conocimiento sobre la idoneidad de aplicar nuevas configuraciones de modelos para datos recuento que permitan incorporar la heterogeneidad no observada en el análisis de la accidentabilidad de motocicletas con datos de exposición.

3.3 HIPÓTESIS

Teniendo en cuenta los objetivos específicos planteados, el presente trabajo de investigación pretende contrastar las siguientes hipótesis:

- H1. Hipótesis n.º 1: *La inversión destinada a la construcción de carreteras ejerce un efecto beneficioso sobre la seguridad vial.*
- H2. Hipótesis n.º 2: *El gasto destinado al mantenimiento de la red viaria ejerce un efecto beneficioso sobre la seguridad vial.*
- H3. Hipótesis n.º 3: *Los efectos de los recursos económicos dedicados a la red viaria pueden variar dependiendo del nivel de desarrollo económico del ámbito de estudio.*
- H4. Hipótesis n.º 4: *La introducción de una medida de exposición al riesgo específica para motocicletas, y el uso de modelos de regresión binomial negativa con parámetros aleatorios mejora el ajuste estadístico y la capacidad predictiva respecto a los modelos usados en la literatura.*
- H5. Hipótesis n.º 5: *El aumento de la tasa de desempleo ejerce un efecto beneficioso en la seguridad vial de los motoristas.*
- H6. Hipótesis n.º 6: *La introducción o modificación de medidas destinadas a condicionar el comportamiento de los usuarios de la vía, tanto legislativas como normativas, provocan una reducción de la siniestralidad.*

CAPÍTULO 4.
MATERIALES Y
METODOLOGÍA

Capítulo 4:

4 MATERIALES Y METODOLOGÍA

El análisis a desarrollar para alcanzar los objetivos establecidos en el apartado anterior, así como la verificación de las hipótesis planteadas, se ha estructurado en tres casos de estudio que cubren dos ámbitos territoriales distintos: internacional, a escala de países europeos (NUTS-0); y nacional, a escala de provincias españolas (NUTS-3). En la Figura 1 se muestran de forma esquemática los tres casos de estudio junto a las hipótesis a contrastar en cada uno de ellos.

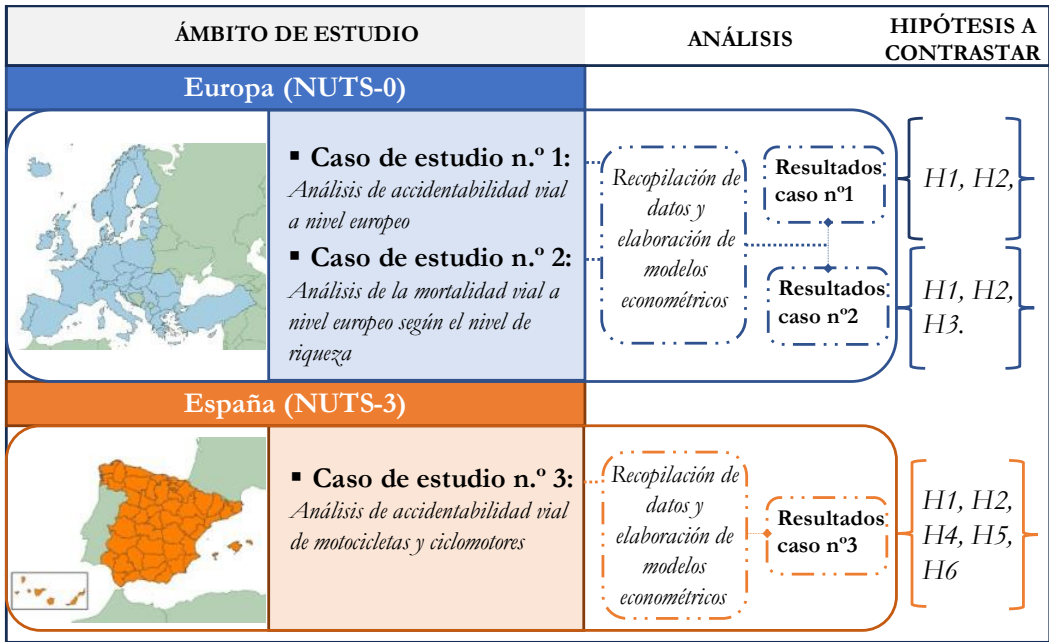


Figura 1. Distribución de los casos de estudio e hipótesis. Fuente: elaboración propia.

Este capítulo se divide en los apartados: 4.1 *Materiales* y 4.2 *Metodología*. En el primero de ellos se describen los datos obtenidos para cada ámbito, y en el segundo se muestra el enfoque metodológico empleado en cada caso de estudio.

4.1 MATERIALES

4.1.1 Datos para los casos de estudio n.º 1 y n.º 2

La formación de una base de datos a nivel europeo se ha basado en la recopilación de datos de diversas fuentes internacionales y nacionales. Uno de los principales factores limitantes a la hora de formar una base común para el mayor número de países posible es la disponibilidad de los propios datos en sí, y con la desagregación requerida según las variables independientes básicas del presente estudio (recursos económicos dedicados a construcción y mantenimiento).

Por otro lado, de cara a obtener series temporales de datos ininterrumpidas para cada país, en algunos casos se ha tenido que recurrir a fuentes auxiliares más específicas del país en cuestión. El esquema general de este proceso de integración de datos se muestra en la Figura 2.

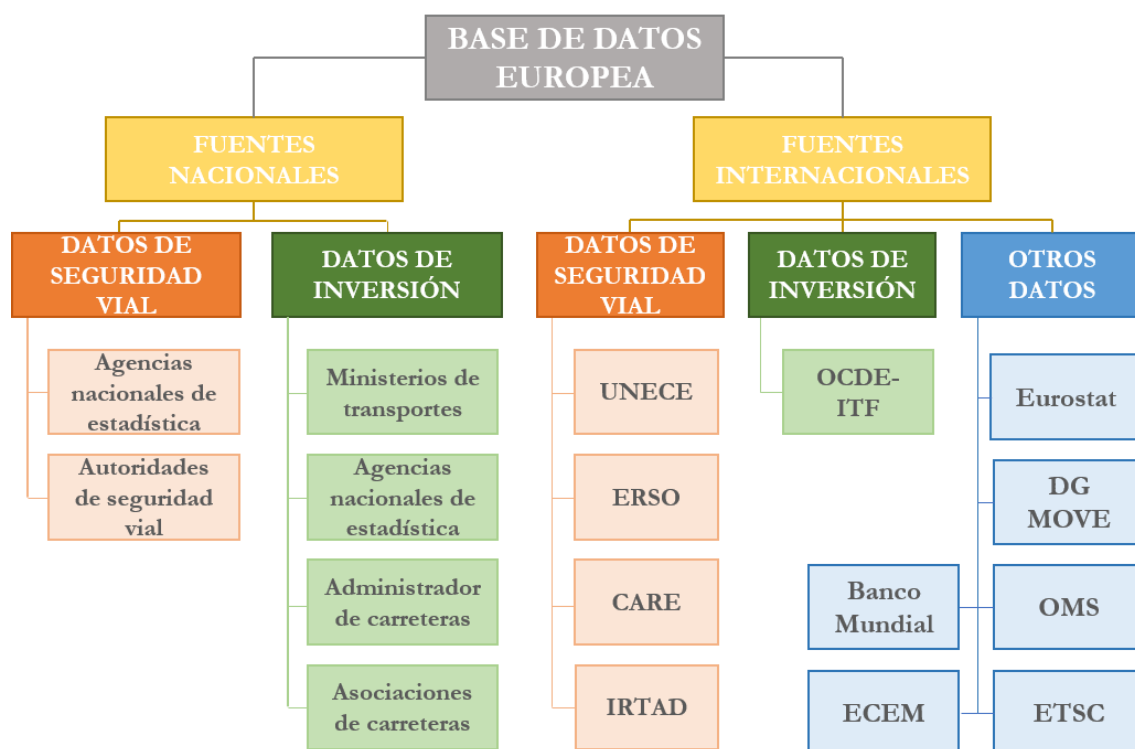


Figura 2. Metodología de elaboración de la base de datos europea. Fuente: elaboración propia.

4.1.1.1 Datos para las variables dependientes

Respecto a los datos de seguridad vial, se han recopilado dos indicadores: número de accidentes con heridos (incluyendo fallecidos) y número de fallecidos, ambos referidos al ámbito interurbano. Estos datos proceden principalmente de la base de datos de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE) y de los informes del *European Road Safety Observatory* (ERSO), el cual publica periódicamente datos de siniestralidad procedentes de CARE, la base de datos comunitaria de seguridad vial de la UE. También se ha recurrido, de forma puntual, a datos procedentes del *International Traffic Safety Data and Analysis Group* (IRTAD). Adicionalmente, y para completar o desagregar apropiadamente algunos de estos datos, se ha recurrido a organismos nacionales que gestionan cifras de seguridad vial, ya sean agencias nacionales de estadística o las propias autoridades de seguridad vial. Finalmente, se han conseguido datos del número de fallecidos en vías interurbanas (computados a 30 días⁶) para un total de 23 países: Alemania, Austria, Bélgica, República Checa, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Italia, Irlanda, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Países Bajos, Noruega, Polonia, Portugal, Suecia y Reino Unido. Estos países se encuentran representados en la Figura 3. Por otro lado,

⁶ Las cifras de fallecidos se computan considerando un plazo de 30 desde la fecha del accidente de tráfico, de acuerdo al Glosario de Estadísticas de Transporte de UNECE-Eurostat-ITF. Se excluyen casos de muertes naturales o en los que existan indicios de suicidio.

para las cifras de accidentes con heridos⁷ en vías interurbanas no se ha llegado a la misma cantidad de países. Debido a la ausencia de datos desagregados y la inconsistencia presente en las series temporales, se han descartado los datos de Lituania, Luxemburgo y Noruega, dejando el set de datos para este indicador en un total de 20 países, los cuales se muestran en la Figura 4. El periodo temporal abarcado para ambas variables comprende desde año 1998 hasta el año 2016.

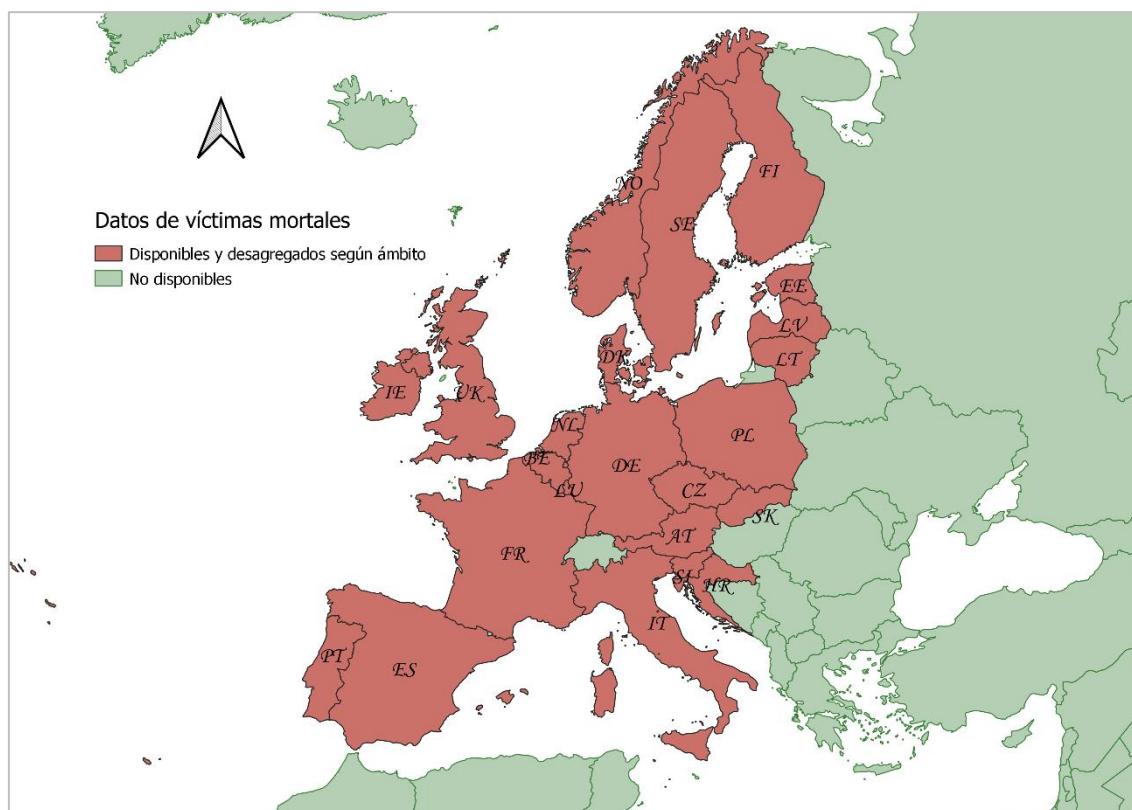


Figura 3. Países con datos de víctimas mortales según ámbito urbano e interurbano. Fuente: elaboración propia a partir de datos de UNECE, ERSO, CARE, IRTAD, agencias nacionales de estadística y autoridades de seguridad vial.

4.1.1.2 Datos para las variables independientes

En cuanto a los datos relativos a los recursos económicos destinados a carreteras, se ha procedido con un enfoque similar: en primer lugar, se ha partido de fuentes internacionales y, posteriormente, se ha procedido a completar los datos faltantes en éstas mediante la consulta de fuentes nacionales, asegurando adicionalmente de esta forma, la correcta consistencia de las series temporales. La principal base de datos de referencia internacional ha sido la del *International Transport Forum* (ITF), perteneciente a la OCDE. Esta fuente de referencia cuenta con datos anuales sobre las inversiones en carreteras para una cantidad

⁷ Un accidente con heridos, o accidente con víctimas, hace referencia a todo aquél que implique, como mínimo, a un vehículo del que resulte por lo menos una persona herida o fallecida (Glosario de Estadísticas de Transporte de UNECE-Eurostat-ITF).

notable de países, encontrándose los recursos económicos desglosados según el tipo de inversión: inversión en construcción y gasto en mantenimiento. Resulta necesario resaltar que este nivel de desglose de los datos de inversión también se encuentra disponible en Eurostat. No obstante, y de forma específica para los datos de inversión en carreteras, hay una menor cantidad de datos disponibles. Además, se han detectado ciertas inconsistencias en las series temporales (por ejemplo: una incorrecta conversión a euros en los países que no pertenecen a la eurozona, como es el caso de Suecia), por lo que se han descartado este tipo de datos.

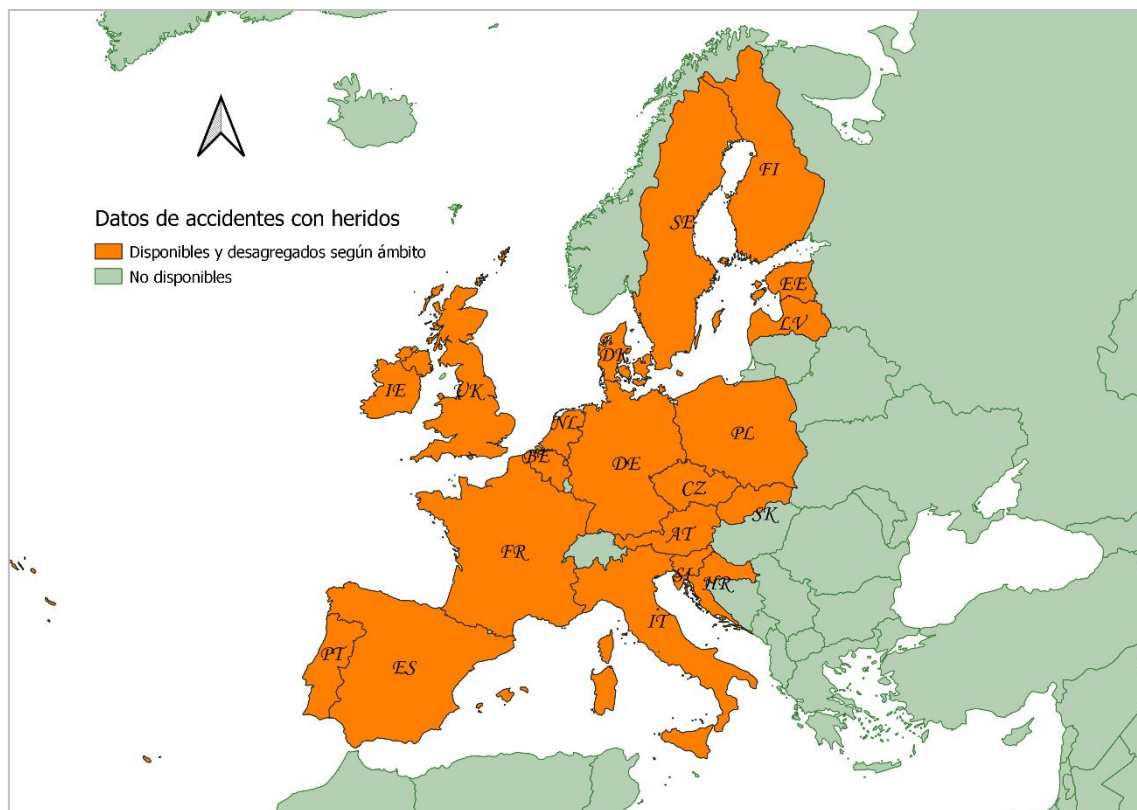


Figura 4. Países con datos de accidentes con heridos y muertos. Fuente: elaboración propia a partir de datos de UNECE, ERSO, CARE, IRTAD, agencias nacionales de estadística y autoridades de seguridad vial.

Las cifras presentes en la base de datos de la OCDE/ITF son comunicadas de forma voluntaria por los organismos oficiales de los países pertenecientes a la organización. Este carácter voluntario puede ser la causa de que el set de datos no esté completamente disponible para todos los años y países indicados. La ausencia de datos se ha apreciado especialmente en los correspondientes al gasto destinado al mantenimiento de la red. Como consecuencia, para completar los datos faltantes de algunos países, se ha recurrido a diversas fuentes nacionales como: anuarios publicados por los ministerios de transportes, en los casos de España, Países Bajos, República Checa o Suecia; informes realizados por administradores de carreteras, en Portugal; publicaciones propias de asociaciones de la carretera, relativas a Italia; o incluso, se han requerido los datos directamente a los ministerios responsables, como en el caso de Alemania. De esta forma, se ha asegurado la consistencia de las series temporales, y se ha conseguido recopilar suficientes datos desglosados según inversión en

Capítulo 4: MATERIALES Y METODOLOGÍA

construcción de carreteras y gastos en mantenimiento para los 23 países de los que se disponen cifras de fallecidos. A continuación, se especifica el conjunto de fuentes nacionales consultadas junto con el país correspondiente:

- *Ministerstvo dopravy*, República Checa;
- *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*, Alemania;
- *Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie*, Austria;
- *Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat*, Países Bajos;
- *Ministério da Economia e Transição Digital*, Portugal;
- *Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana*, España;
- *Trafikverket*, Suecia;
- *Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer*, Francia;
- *Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti*, Italia;
- *Statistisk sentralbyrå*, Noruega;
- *Trafikanalys*, Suecia;
- *Instituto Nacional de Estatística*, Portugal;
- *Road Safety Authority (RSA)*, Ireland;
- *Asociación de Empresas de Conservación y Explotación de Infraestructuras (ACEX)*, España;
- *Fondazione Filippo Caracciolo*, Italia;
- *Automobile Club d'Italia*, Italia;
- *Institut Belge pour la Sécurité Routière (IBSR)*, Bélgica;
- *Infraestruturas de Portugal S.A.*, Portugal;

Respecto a otros datos a considerar en el estudio, se han obtenido principalmente de fuentes internacionales, aunque puntualmente también se ha recurrido a ciertas fuentes nacionales citadas en el párrafo anterior (básicamente, anuarios estadísticos y agencias nacionales de estadística). En este caso, las principales fuentes de referencia han sido Eurostat y la Dirección General de Movilidad y Transportes (DG MOVE) de la Comisión Europea. Y, para datos más específicos o no disponibles en las fuentes anteriores, se ha obtenido o solicitado información del Banco Mundial, la Organización Mundial de la Salud (OMS), el European Transport Safety Council (ETSC), la OCDE, el proyecto de investigación EU BestPoint-Project y de European Climatic Energy Mixes (ECEM), del Servicio de Cambio Climático de Copernicus.

Una vez obtenida toda la información sobre datos de interés para el estudio a nivel europeo, y garantizadas tanto la homogeneidad en la definición de las mismos como la consistencia de las series, se ha procedido a integrar todos los datos, utilizando los softwares estadísticos R y STATA, en una base de datos general a nivel europeo. A modo de resumen, en la Tabla 4 se muestra la composición de esta base de datos, junto con la definición de los mismos y las fuentes consultadas. La base de datos generada se encuentra fuertemente balanceada, con series temporales completas que abarcan el periodo 1998-2016 para los 23 países considerados, con la única excepción de los datos acerca del número de accidentes en vías interurbanas, que no contemplan a tres de los países anteriores.

Tabla 4. Datos recopilados a nivel europeo

Variable	Unidad	Fuentes
Fallecidos en vías interurbanas	Número	UNECE, ERSO, CARE, IRTAD, agencias nacionales de estadística, autoridades de seguridad vial
Accidentes con heridos en vías interurbanas	Número	UNECE, ERSO, CARE, agencias nacionales de estadística, autoridades de seguridad vial
Distancia recorrida	Miles de millones de viajeros-km	DG-Move
Inversión en construcción	Miles de euros (precios corrientes)	OCDE/ITF, ministerios de transportes, agencias nacionales de estadística, administrador de carreteras, asociaciones de carreteras
Gasto en mantenimiento	Miles de euros (precios corrientes)	OCDE/ITF, ministerios de transportes, agencias nacionales de estadística, administrador de carreteras, asociaciones de carreteras
Longitud de la red de carreteras interurbana	Kilómetros	DG-Move, Eurostat, ministerios de transportes
Longitud de vías de gran capacidad	Kilómetros	DG-Move, Eurostat, ministerios de transportes
Población	Habitantes	Eurostat
Tasa de desempleo	Porcentaje	Eurostat
Consumo de alcohol	Litros per cápita, población mayor de 15 años	OMS

Variable	Unidad	Fuentes
Parque automovilístico	Número de turismos	DG-Move
Producto Interior Bruto	Miles de euros (precios corrientes)	Banco Mundial, Eurostat
Precipitación media anual en forma de lluvia	Mm/año	ECEM
Sistema de carnet por puntos	Ficticia (año de implementación)	ETSC, EU BestPoint-Project
Índice de Precios al Consumo	(sin unidad)	OCDE

4.1.2 Datos para el caso de estudio n.º 3

Puesto que no se han encontrado datos suficientemente desglosados del volumen de tráfico de vehículos de dos ruedas y de la siniestralidad de este tipo de vehículos a nivel europeo, se va a realizar este estudio a nivel nacional en España donde, tal y como se va a ver a continuación, sí se han encontrado los datos necesarios.

4.1.2.1 Datos para la variable dependiente

En el Capítulo 2 se señalaba la ausencia de datos de exposición específicos para V2RM como uno de los motivos por los que hay escasa literatura acerca de los factores influyentes en la siniestralidad de estos usuarios. Para el caso de España, tan solo se han encontrado datos de exposición relativos a la distancia recorrida (veh-km) por motocicletas en la Red de Carreteras del Estado (RCE). Los datos de tráfico de motos están disponibles desde 2007 hasta 2019 en los anuarios estadísticos del MITMA (2021b). No obstante, a partir del año 2016 se produce un salto en la estimación de la cantidad de veh-km realizada por el MITMA, dividiendo la serie en dos periodos comparables: 2007-2015 (9 años) y 2016-2019 (4 años). Para el presente caso de estudio, se han escogido los datos comprendidos entre 2007 y 2015, puesto que hay un mayor número de años disponibles. Los datos de exposición (junto con los de inversión) han sido los que determinan la unidad espacial (provincias) y la temporal (años).

Concretamente, se han recopilado datos de exposición correspondientes a las 43 provincias (NUTS-3) indicadas en la Figura 5 durante el periodo 2007-2015, éstas son: *Albacete, Alicante, Almería, Asturias, Ávila, Badajoz, Barcelona, Burgos, Cáceres, Cádiz, Cantabria, Castellón, Ciudad Real, Córdoba, Cuenca, Gerona, Granada, Guadalajara, Huelva, Huesca, Jaén, La Coruña, La Rioja, León, Lleida, Lugo, Madrid, Murcia, Orense, Palencia, Pontevedra, Salamanca, Segovia, Sevilla, Soria, Tarragona, Teruel, Toledo, Valencia, Valladolid, Zamora y Zaragoza*.

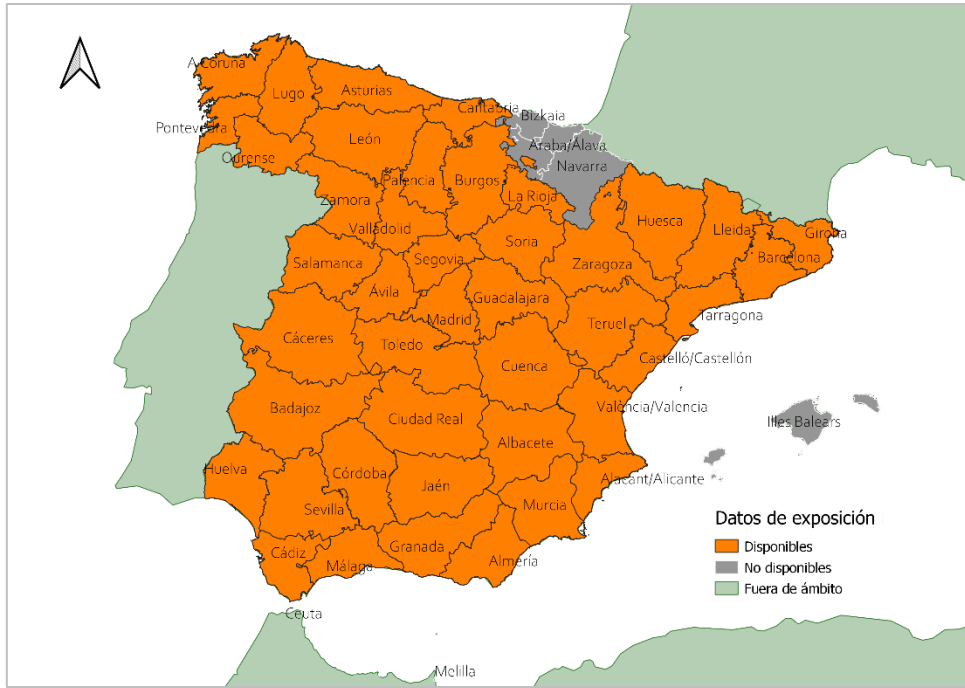


Figura 5. Provincias con datos de exposición al riesgo de las motocicletas. Fuente: elaboración propia.

Para obtener el número de accidentes de motos por provincia y año, se han utilizado los ficheros de microdatos de la DGT desde 2007 hasta 2015 (DGT, 2022c). A partir de ellos, se ha contabilizado el total de accidentes con víctimas ocurridos por provincia y año en la RCE, seleccionando solamente aquéllos en los que hay involucrados motocicletas.

4.1.2.2 Datos para las variables independientes

Respecto a los recursos económicos destinados a red de carreteras, se pueden distinguir distintos organismos inversores (ver Figura 6). En el caso de la RCE, son tres los organismos inversores: Estado (MITMA), las Sociedades Concesionarias de Autopistas de Peaje y la Sociedad Estatal de Infraestructuras del Transporte Terrestre. La inversión total realizada por estos organismos figura en los anuarios estadísticos del MITMA, no obstante, no aparece desglosada por provincias.

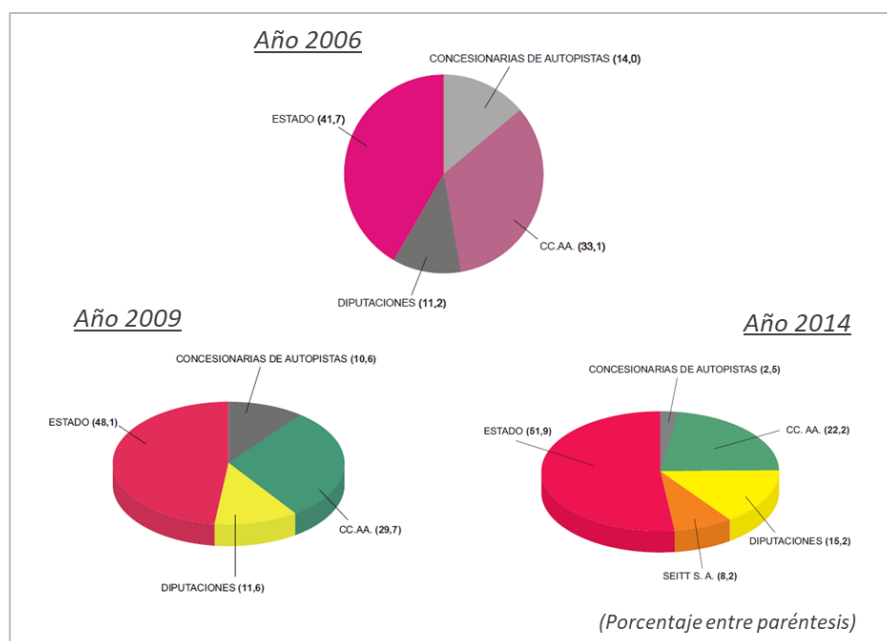


Figura 6. Recursos económicos dedicados a carreteras según organismo inversor. Años 2006, 2009 y 2014. Fuente: MITMA (2021a).

Así pues, con el fin de desglosar los datos de inversión según tipología (construcción y mantenimiento) y provincia se ha recurrido a las siguientes fuentes de información:

- El *anuario estadístico*, del MITMA;
- El *Informe sobre el sector de autopistas de peaje en España*, publicado anualmente por la Delegación del Gobierno en las Sociedades Concesionarias de Autopistas Nacionales de Peaje (DGSCANP), adscrita al MITMA;
- El documento de *El tráfico en las autopistas de peaje*, realizado por la Dirección General de Carreteras (DGC) del Ministerio de Fomento (actual MITMA);
- Los *Presupuestos Generales del Estado (PGE)*, publicados por el Ministerio de Hacienda y Función Pública;
- Los *Convenios de Gestión Directa* suscritos entre la Administración General del Estado (MITMA) y la SEITT;
- Y, el Boletín Oficial del Estado (BOE).

De forma esquemática, el proceso de estimación de la inversión en construcción por provincias se muestra en la Figura 7, mientras que el del gasto en mantenimiento se encuentra en la

Figura 8.

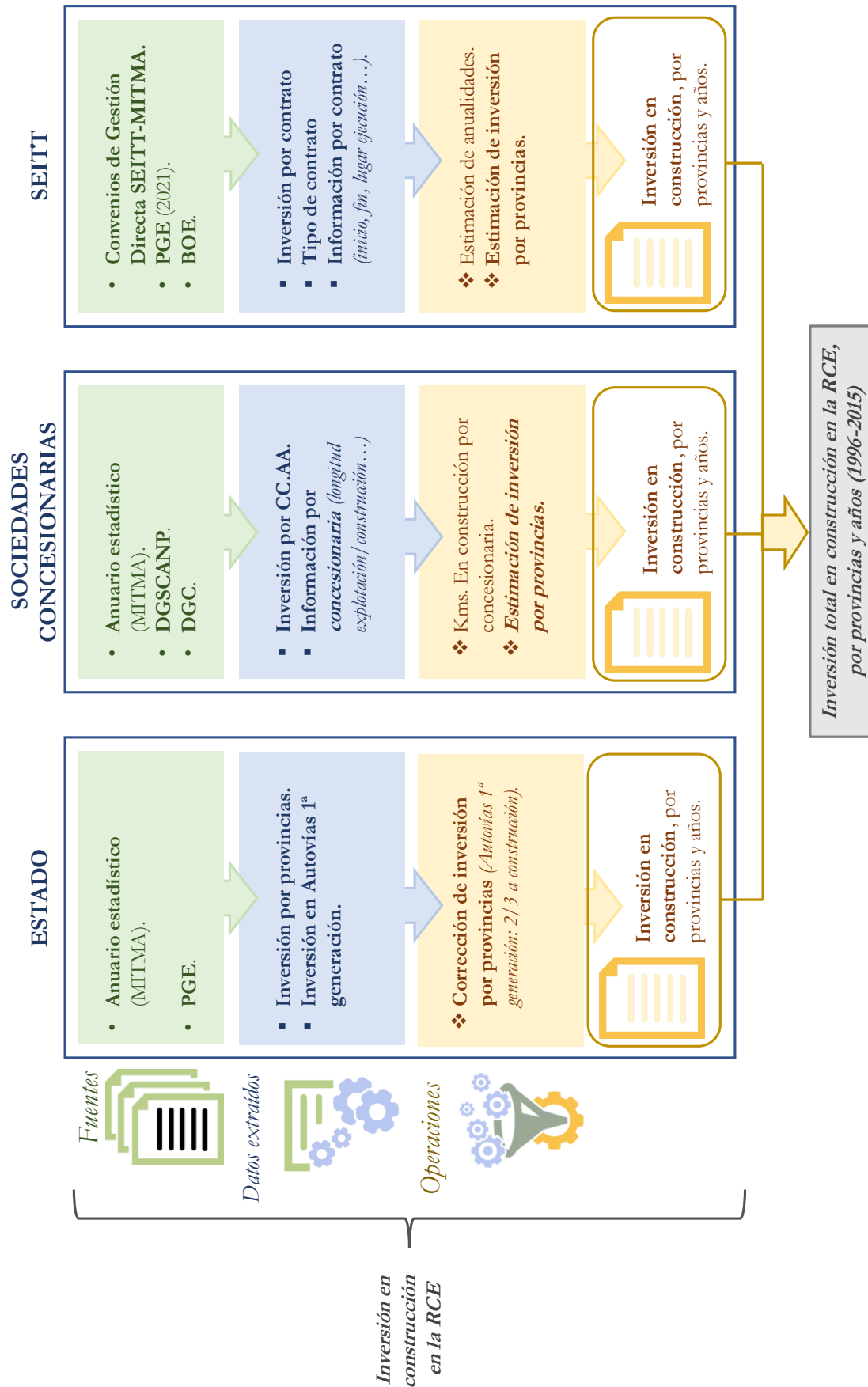


Figura 7. Esquema del proceso de estimación de los datos de inversión en construcción por provincias. Fuente: elaboración propia.

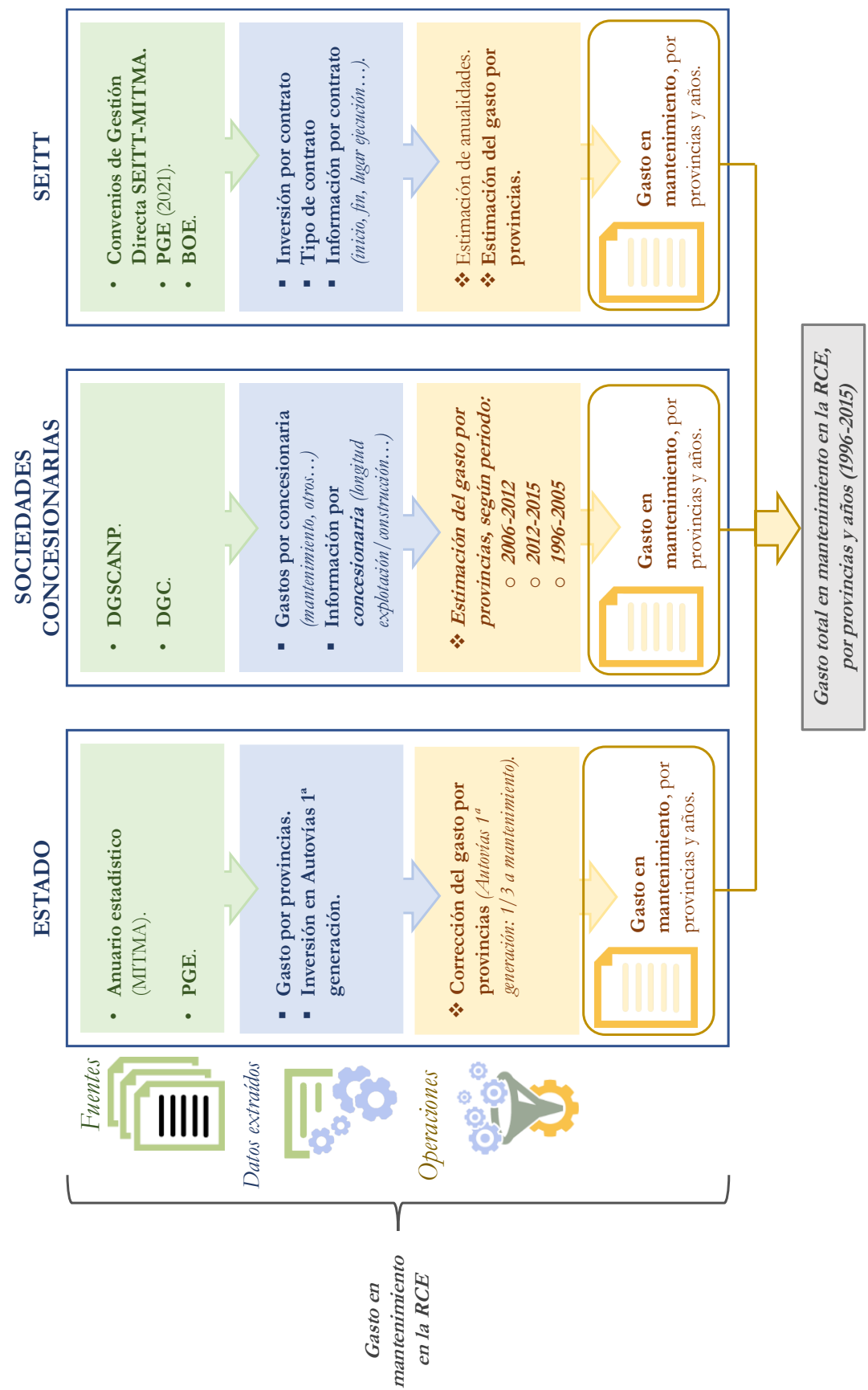


Figura 8. Esquema del proceso de estimación de los datos del gasto en mantenimiento por provincias. Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, en la Tabla 5 se muestran todos los datos recopilados para este caso de estudio, los cuales se utilizarán posteriormente para la formación de variables a incluir en los modelos de siniestralidad de motocicletas.

Tabla 5. Datos a nivel nacional (provincias españolas), junto con sus definiciones y fuentes de procedencia.

Variable	Unidad	Fuentes
Accidentes	Número	DGT (2022)
Distancia recorrida por motos	Millones de Veh-km	Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) (2021)
Inversión en construcción	Miles de euros (valores corrientes)	MITMA (2021b), MITMA (n.d.), Ministerio de Hacienda y Función Pública (2022), Ministerio de Fomento (n.d.), SEITT (n.d.)
Gasto en mantenimiento	Miles de euros (valores corrientes)	MITMA (2021b), MITMA (n.d.), Ministerio de Hacienda y Función Pública (2022), Ministerio de Fomento (n.d.), SEITT (n.d.)
Distancia recorrida por vehículos ligeros y pesados	Millones de Veh-Km	MITMA (2021)
Longitud de carreteras según tipo de vía	Kilómetros	MITMA (2021b)
PIB per cápita	Miles de euros (valores corrientes)	Instituto Nacional de Estadística (INE) (2019)
Edad mediana de la población	Años	INE (2019b)
Tasa de desempleo	%	INE (2016)
Precio de la gasolina	Céntimos de euro por litro (valores corrientes)	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020)
Precipitación anual	mm.	Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2022)
Cambios legislativos sobre seguridad vial	-	Boletín Oficial del Estado (BOE)

Capítulo 4: MATERIALES Y METODOLOGÍA

Variable	Unidad	Fuentes
Índice de Precios de Consumo (IPC)	-	INE (2021)
Índice de Coste de la Construcción para la Ingeniería Civil	-	MITMA-Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital

4.2 METODOLOGÍA

Partiendo de la revisión bibliográfica realizada en el capítulo dos, la metodología estadística empleada en la práctica totalidad de estos estudios se corresponde con modelos para datos de panel de dos tipos: modelos de regresión lineal (Bishai *et al.*, 2006; Brzozowska-Rup y Nowakowska, 2020; Castillo-Manzano *et al.*, 2014; Economou *et al.*, 2008; Gerdtham y Ruhm, 2006; Houston *et al.*, 1995; Kopits y Cropper, 2005; Paulozzi *et al.*, 2007; Rojo *et al.*, 2018; Ruhm, 2000; Sánchez-González *et al.*, 2021; Sánchez González *et al.*, 2020, 2018; Sun *et al.*, 2019; van Beeck *et al.*, 2000; Yannis *et al.*, 2011) y modelos de datos de recuento (Abdul Manan *et al.*, 2013; Albalade *et al.*, 2013; Aparicio Izquierdo *et al.*, 2013; Castillo-Manzano *et al.*, 2021, 2014; Elvik, 2015; Fridstrøm e Ingebrigtsen, 1991; Harnen *et al.*, 2003; Law *et al.*, 2009; Nguyen-Hoang y Yeung, 2014; Rolison *et al.*, 2013; Stickley *et al.*, 2021).

Como punto en común entre ambos enfoques, Noland y Karlaftis (2005) realizaron un análisis de sensibilidad ante varias especificaciones de modelos de regresión lineal y modelos de datos de recuento (regresión binomial negativa) y destacaron que, cuando se utilizaban tasas de riesgo, las estimaciones eran similares en magnitud y, sobre todo, en signo de influencia. Teniendo en cuenta estos resultados, en el presente trabajo de investigación se incluye la distancia recorrida (ya sea en viajeros-km o veh-km) como medida de exposición al riesgo en todos los modelos econométricos. De esta forma, se pretende garantizar que las conclusiones extraídas de distintos tipos de modelos sean comparables.

Por otro lado, la elección de una tipología u otra está asociada a las características propias de los datos que componen las series temporales de sección transversal (TSCS⁸) o datos de panel. En este aspecto, Antoniou *et al.* (2016) realizaron una clasificación sistemática de los distintos enfoques analíticos para datos de panel a nivel macro, en función de las dimensiones o estructura de los datos. Es decir, según la relación entre las N entidades y T observaciones. En líneas generales, cuando la dimensión temporal (T) es suficientemente grande o predomina sobre la dimensión transversal (N), se recomienda el análisis mediante regresiones lineales. Por otro lado, cuando la dimensión transversal (N) es predominante, el empleo de modelos de recuento se plantea como el más adecuado.

Por supuesto, el empleo de un modelo particular requiere además del cumplimiento de una serie de asunciones intrínsecas al mismo. Por tanto, a continuación, se profundizará de forma más específica en cada caso de estudio, tanto en los datos de partida como en la formulación de un modelo econométrico particular.

⁸ Siglas en inglés de Time-Series Cross-Sectional (TSCS)

4.2.1 CASO DE ESTUDIO N.º 1: Análisis a nivel europeo

4.2.1.1 El contexto europeo

Según la OMS/WHO (2023), Europa es la región global que cuenta con la menor tasa de fallecidos por habitante, siendo esta cifra de 7,0 muertos por cada 100.000 habitantes en el año 2021, lo que se asemeja a un tercio de la correspondiente para el mismo año en los países menos desarrollados: 21,0. Más resaltante si cabe, resulta el hecho de que esta tasa ha seguido un descenso continuo desde 2010 (-36%), al igual que en las regiones del Mediterráneo oriental y el Pacífico occidental (-16%), como se puede comprobar en la Figura 9. Lo contrario ocurre en las regiones de África (+17%), mientras que, en las regiones de América (-0,1%) y Sudeste asiático (-2%), las cifras de fallecidos se han mantenido en 2021 prácticamente al mismo nivel del año 2010.

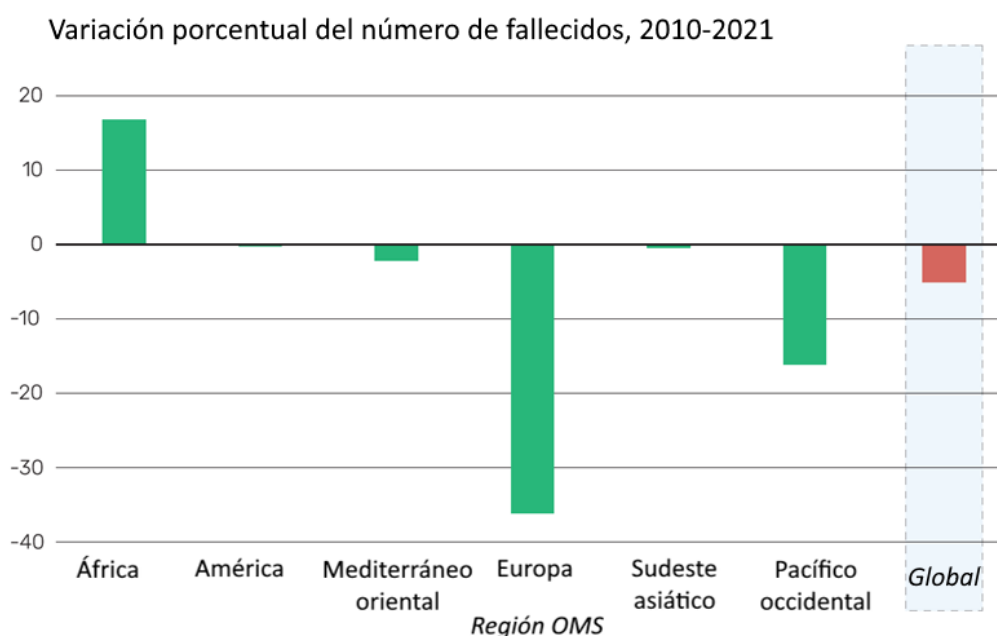


Figura 9. Variación porcentual en las cifras de fallecidos entre 2010 y 2021, según regiones globales.
Fuente: adaptado de WHO (2023).

La relativamente baja tasa de mortalidad de la región europea puede entenderse como consecuencia de un largo proceso de mejora en la gestión de la seguridad vial, la cual se ha ido volviendo más ambiciosa con el paso del tiempo. Bliss y Breen (2009) clasificaron la evolución de este proceso en cuatro fases, según el enfoque prioritario de las estrategias de seguridad vial que se ha ido implementando en los países con mayor desarrollo económico (OCDE):

- Fase 1 (*Centrada en intervenciones sobre el conductor*): En las décadas de 1950 y 1960, la rápida motorización de los países desarrollados condujo a una creciente preocupación por el incremento de las muertes derivadas de los accidentes de tráfico. Al identificarse al error humano como el principal factor de ocurrencia de accidentes,

las intervenciones se centraron en modificar el comportamiento de los conductores, bien a través de medidas legislativas y sanciones, o bien mediante campañas de concienciación para conductores;

- Fase 2 (*Centrada en intervenciones sobre todo el sistema*): En las décadas posteriores, 1970 y 1980, se evidenció la necesidad de trasladar el enfoque de las intervenciones a todo el sistema en su conjunto. Las políticas de seguridad vial comenzaron a ampliar el foco de sus objetivos, desde una visión centrada en la prevención hacia una visión más general que incluya todas las etapas de un accidente. Esta visión de las estrategias de seguridad vial está ampliamente basada en el nuevo marco teórico propuesto por Haddon (1968), el cual englobaba a los tres grupos de factores influyentes en un siniestro (usuario, vehículo e infraestructura) durante las tres etapas por las que se produce el mismo: pre-accidente, accidente y post-accidente;
- Fase 3 (*Centrada en intervenciones sobre todo el sistema, con objetivos establecidos y liderazgo institucional*): Al comienzo de la década de 1990, destacaron las buenas prácticas de algunos países que adoptaron el enfoque de intervenciones sistémicas. Concretamente, aquéllos que fijaron objetivos numéricos para la disminución del número de fallecidos y que, además, implicaron a diversos organismos institucionales responsables de la seguridad vial. Un ejemplo destacado fue Reino Unido, el cual consiguió reducir a la mitad su tasa de fallecidos durante el periodo 1972-1999, mientras que la movilidad se vio duplicada para el mismo periodo (Keep y Rutherford, 2011). Según Bliss y Breen (2009), en esta fase se pone en evidencia que el crecimiento de la motorización no tiene por qué implicar un incremento en la tasa de mortalidad, sino que dicha tasa se puede incluso revertir a través de inversiones destinadas a mejorar el sistema de transporte por carretera;
- Fase 4 (*Centrada en el enfoque Sistema Seguro, objetivos de Visión Cero a largo plazo y responsabilidad compartida*): A final de la década de 1990, las estrategias de Sistema Seguro y Visión Cero impulsadas en Países Bajos (Wegman, 1995) y Suecia (Ley 1996/97:137), respectivamente, vuelven a cambiar el paradigma de la seguridad vial. Estos nuevos enfoques sistémicos parten de la premisa de que las muertes y los heridos graves en carretera son intolerables, y, por consiguiente, no deben entenderse como un mal necesario derivado de la movilidad. Además, se plantea el objetivo último a largo plazo de eliminar todas las muertes y responsabiliza a todo el sistema de transporte, no solo al usuario, en la labor de realizar una movilidad segura. Actualmente, el enfoque de Sistema Seguro y los objetivos de Visión Cero componen las piezas clave de multitud de planes y estrategias de seguridad vial a nivel mundial. En Europa, el vigente plan estratégico de seguridad vial 2021-2030 de la UE ratificó el objetivo a largo plazo de Visión Cero y adoptó el marco teórico de Sistema Seguro (European Commission, 2020).

Continuando en el contexto de la UE, a partir del año 2000 se establecen de forma generalizada para todos los países miembros, unos objetivos de reducción del número de muertos en un 50% para el año 2010. Estos objetivos se definieron en el Libro Blanco del transporte (Comisión Europea, 2002) y debían adoptarse tanto por los 15 países miembro de aquel momento, como por los países candidatos que habían aceptado el acervo comunitario. En 2004, diez de estos países candidatos formalizaron su adhesión a la UE —

República Checa, Chipre, Eslovaquia, Eslovenia, Estonia, Hungría, Letonia, Lituania, Malta y Polonia—, representando la mayor ampliación de su historia. En 2007 también se incorporaron Bulgaria y Rumanía, mientras que la última ampliación de la UE se realizó en 2013, con la adhesión de Croacia. Por otro lado, y de cara a cumplir con los objetivos comunitarios previstos para 2010, dentro del tercer programa de acción europeo de seguridad vial (Comisión Europea, 2003) se destacaba la necesidad de efectuar inversiones masivas como medidas de mejora de la seguridad vial en la red viaria transeuropea (RTE), especialmente en los países que se iban a incorporar inminentemente. Finalmente, en 2010 las muertes en carretera en la UE se redujeron un 43% con respecto a las cifras de 2001, siendo esta reducción incluso del 48% si solo se considera a los quince países que originalmente adoptaron el objetivo planteado en 2001 (ETSC, 2011). A pesar de no alcanzar el 50% de reducción, la adopción de unos objetivos cuantificables demostró ser una medida eficaz y mostró un punto de inflexión en la mejora de la seguridad vial. En la Figura 10 se muestra la evolución del número de víctimas mortales en la UE desde el año 2000 hasta el 2020, desglosada según los procesos de adhesión (los datos de Reino Unido se incluyen separados, aunque no dejó de ser miembro de la UE hasta 2021). La cifra general para el conjunto de los 28 países en 2010 fue de 31.596, muy alejada de las 56.460 víctimas mortales en el año 2000.

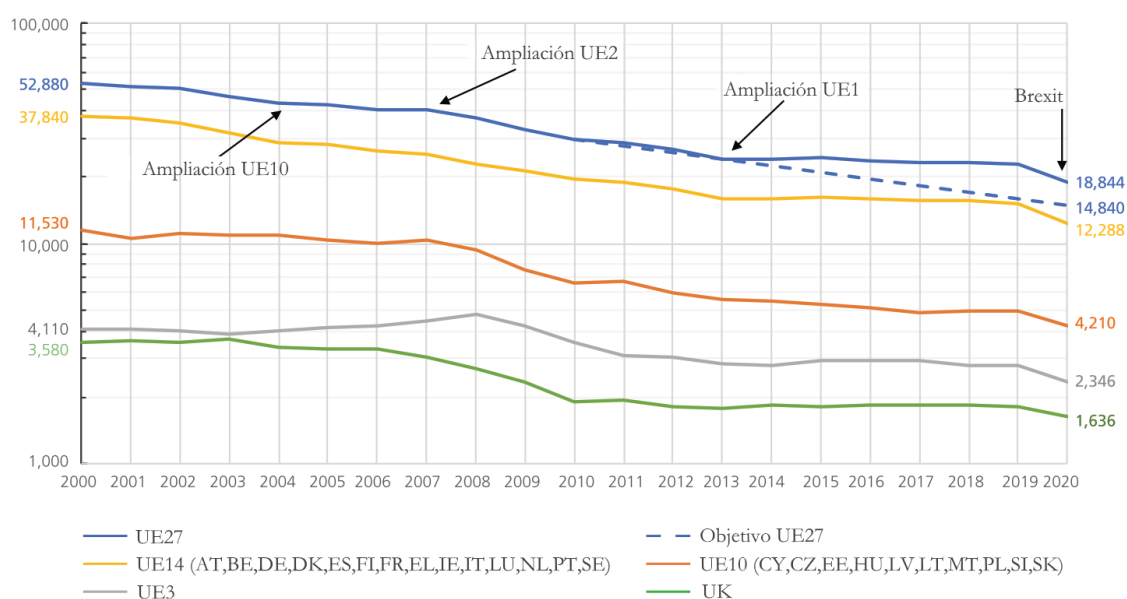


Figura 10. Número de víctimas mortales desde el año 2000 hasta 2020 en la UE27 (en escala logarítmica). Fuente: Adaptado de ETSC (2021).

La Figura 10 también refleja una evolución diferente para los 15 países que pertenecían a la UE en el momento de definir el objetivo de reducción y los 13 que se adhirieron después. Mientras que los países UE15 mostraron un descenso relativamente constante entre 2000 y 2010 (en Reino Unido se comienza a notar a partir de 2003), los países UE10 concentraron la reducción de víctimas entre 2007 y 2010 (con un descenso mucho más pronunciado), y, por último, los UE3 (Croacia, Bulgaria y Rumanía) consiguieron detener la tendencia ascendente que llevaban hasta 2008, e invertirla a partir de entonces.

Tras el gran avance en materia de seguridad vial producido en este comienzo de siglo, la Comisión Europea propuso nuevamente el objetivo de reducir a la mitad el número total de víctimas mortales en las carreteras de la Unión Europea para 2020, tomando como referencia las cifras de 2010 (Comisión Europea, 2010). No obstante, los resultados obtenidos en esta década de acción no fueron tan fructíferos y, además, las cifras finales de 2020 deben tomarse con cautela por el contexto de la pandemia de COVID-19. Para 2020, el conjunto de países de la UE28 consiguió reducir el número de muertes en un 33%, sin embargo, un 15,6% de esta reducción se produjo entre 2019 y 2020, en una época con fuertes restricciones de movilidad derivadas de la pandemia de COVID-19 (ETSC, 2021). Por otro lado, como se puede apreciar en la Figura 10, la reducción de muertes entre 2010 y 2013 siguió una tendencia alineada con el objetivo planteado. No obstante, a partir de 2013 se produjo un estancamiento en el proceso de reducción de muertes, y desde el año 2013 hasta el 2019 tan solo se redujeron en un 6%.

De forma paralela a este largo proceso de mejora de la seguridad vial, el transporte de personas y mercancías por carretera ha crecido de forma constante desde la década de los 90 en todos los países de la UE, con unos incrementos acumulados del 50% y 40%, respectivamente, durante el periodo 1995-2019 (European Commission, 2022). Asimismo, esta creciente demanda está asociada al desarrollo de la infraestructura viaria y a las inversiones destinadas a la misma. En la Figura 11 se muestra la estimación de estas inversiones realizada por la Dirección General de Movilidad y Transportes de la UE (DG MOVE) para el conjunto de los 28 países miembros. En ella puede observarse, de forma generalizada para los UE28, un aumento continuado de los recursos económicos destinados a la construcción de carreteras desde el año 1995 hasta 2009, suponiendo estos recursos un 0,5% del PIB comunitario en 1995 y del 0,8% en 2009. A partir de 2009, y como consecuencia de la crisis económica mundial que comenzó en 2008 en EE.UU., las inversiones en construcción descendieron paulatinamente hasta volver a un nivel de inversión similar al de 1995, equivalente a una cifra de 69.000 millones de € (ajustados en paridad de poder adquisitivo, PPS) (European Commission, 2019).

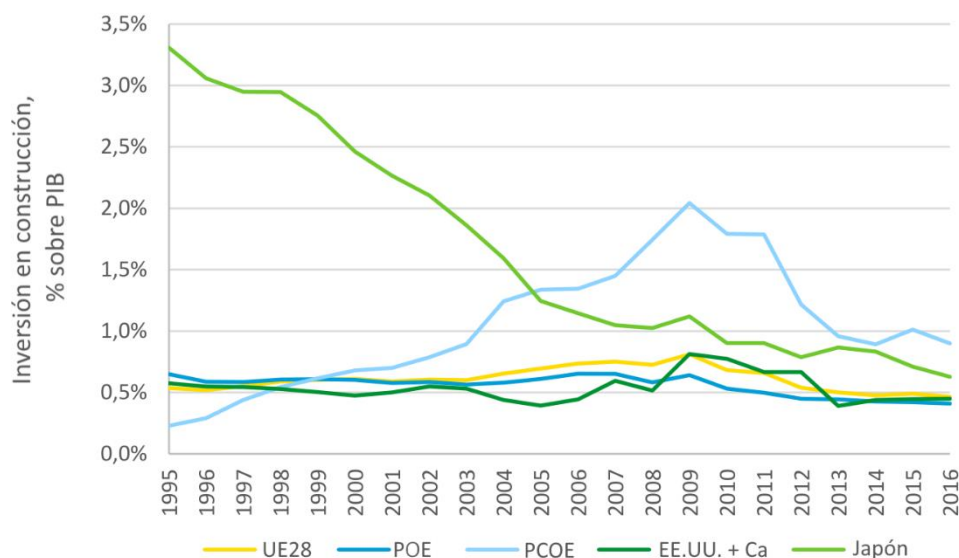


Figura 11. Inversiones anuales en construcción de carreteras, en porcentaje relativo al PIB, 1995-2016. Fuente: adaptado de European Commission (2019).

Atendiendo a una distribución de según Países Occidentales de Europa (POE)⁹ y Países Centrales y Orientales de Europa (PCOE)¹⁰, los POE siguen una evolución más suave, en la que mantienen unos niveles de inversión cercanos al 0,6% hasta 2009, para luego descender hasta el 0,4% de su PIB. Por otro lado, los PCOE siguen una evolución bastante más acentuada, motivada en buena parte por su condición de países candidatos y una mayor necesidad de desarrollo de sus infraestructuras. De esta forma, se puede observar en la Figura 11 un rápido crecimiento de la dotación presupuestaria a la construcción de carreteras, pasando de estar cercana al 0,2% del PIB en 1995, a superar ligeramente el 2% en 2009. El descenso de la dotación económica tras la Gran Recesión también fue superior en los PCOE, aunque en este caso los recursos descendieron hasta suponer el 1% del PIB en 2013 y se mantuvieron relativamente constantes a partir de ahí.

Por otro lado, el gasto efectuado en mantenimiento de carreteras se muestra en la Figura 12. En este caso, el porcentaje de gasto y su evolución, difieren considerablemente entre los POE y los PCOE. El grupo de POE partía de un gasto ligeramente superior al 0,4% de su PIB en 1995, una cifra que desciende hasta alcanzar el 0,3% en 2001 y que, a pesar del repunte hasta 2006 (0,35%), continúa su descenso de forma prolongada hasta alcanzar el mínimo en 2016, con un 0,25%. Mientras tanto, el grupo de PCOE partía con un porcentaje de gasto en mantenimiento de carreteras considerablemente inferior al de los POE, de aproximadamente el 0,1% de su PIB. A pesar de ello, los recursos destinados al mantenimiento crecieron

⁹ Países Occidentales de Europa (POE): Austria, Bélgica, Chipre, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Malta, Países Bajos, Portugal, España, Suecia, Reino Unido, Noruega y Suiza.

¹⁰ Países Centrales y Orientales de Europa (PCOE): Bulgaria, Croacia, República Checa, Estonia, Hungría, Letonia, Lituania, Polonia, Rumanía, Eslovaquia y Eslovenia.

rápidamente hasta alcanzar valores superiores al 0,9% en 2006. A partir de entonces, dichos valores fluctuaron entorno al 0,8% hasta 2010, momento en el que comienza un fuerte descenso que continuaría hasta alcanzar un valor equivalente al 0,4% en 2016. El gasto en mantenimiento total, UE28, estimado por la DG MOVE en 2016 fue de 38.000 millones de euros (ajustados PPS), un 14% inferior a la dotación equivalente efectuada en 1995 (European Commission, 2019).

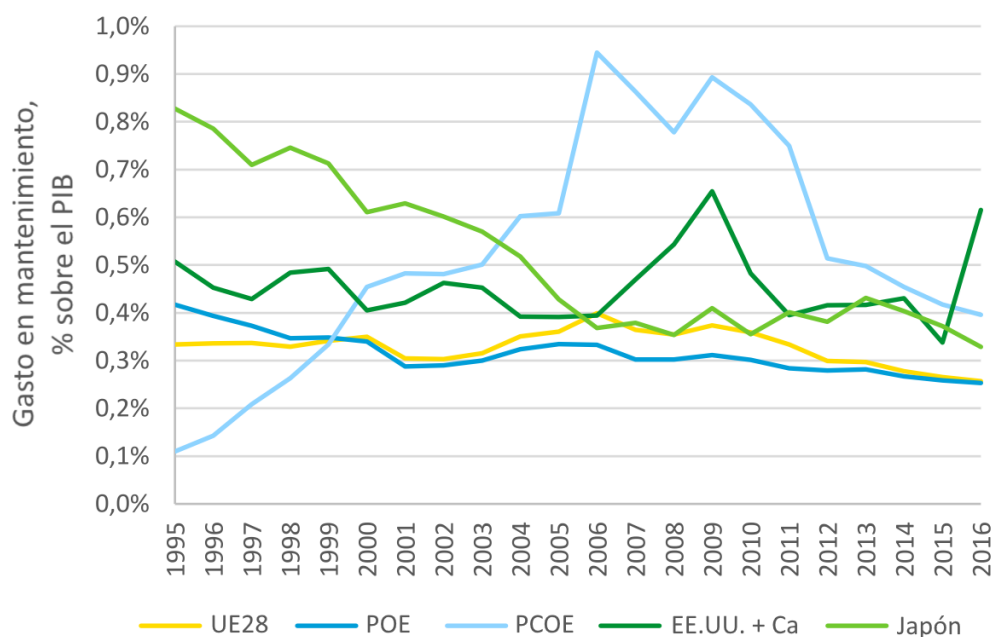


Figura 12. Gasto anual en mantenimiento de carreteras, en porcentaje relativo al PIB, 1995-2016.

Fuente: adaptado de Comisión Europea (2019)

En líneas generales, en las últimas tres décadas se ha avanzado enormemente en la mejora de la seguridad vial. Durante este periodo, se ha consolidado un enfoque holístico en la gestión de la seguridad vial, pasando de un marco teórico de culpabilizar a la víctima por sus errores, a un enfoque de corresponsabilidad de todo el sistema de transporte por carretera. En esta sintonía, numerosos planes de acción y estrategias de seguridad vial a nivel europeo, han resaltado el papel de la inversión en carreteras como un instrumento para materializar sus objetivos de seguridad. A pesar del consenso acerca de las necesidades de inversión, la crisis financiera originada en 2008 ha condicionado las dotaciones presupuestarias de los años venideros, afectando considerablemente a las inversiones destinadas a la construcción de carreteras y, especialmente, al gasto en mantenimiento de las mismas. Además, este periodo de bajo nivel de inversión, coincide también con el periodo de estancamiento o escasa reducción del número de víctimas mortales en la UE (2013-2019), y en un momento en el que se ratifica el ambicioso objetivo a largo plazo de erradicar las muertes en carreteras para 2050 (Council of the European Union, 2017). Considerando que la Comisión Europea señala a las inversiones en construcción de carreteras y al mantenimiento de la infraestructura existente como puntos clave en su nuevo marco estratégico (European Commission, 2020),

la presente tesis doctoral pretende verificar las hipótesis acerca de la influencia de la inversión en construcción y del gasto en mantenimiento sobre la siniestralidad vial.

4.2.1.2 Selección de variables

En la Tabla 6 se muestra una comparación del tráfico, el nivel de inversión en carreteras y los accidentes con heridos ocurridos, desglosada por países para los años inicio y final del presente estudio. De forma similar a lo comentado en el apartado 4.2.1.1, se puede apreciar el incremento del tráfico total (12% aprox.) junto con un descenso del número de accidentes (26,40% aprox.), así como un menor nivel de inversión en 2016 (0,62% del PIB) que el ejecutado en 1998 (0,81%).

Tabla 6. Comparación de tráfico, inversión y accidentes entre el año 1998 y 2016.

País	AÑO 1998			AÑO 2016		
	Tráfico (mil millones de vkm)	Inversión (% sobre PIB)	Accidentes	Tráfico (mil millones de vkm)	Inversión (% sobre PIB)	Accidentes
Alemania	828,07	0,24%	137.049	946,80	0,30%	96.459
Austria	64,86	0,47%	15.733	80,44	0,32%	13.540
Bélgica	100,15	0,08%	31.272	106,14	0,31%	24.972
Croacia	17,50	1,79%	2.030	26,18	0,93%	1.791
Dinamarca	50,33	0,57%	3.101	59,09	0,72%	1.181
Eslovaquia	19,30	1,26%	3.261	27,84	1,20%	2.088
Eslovenia	18,98	1,72%	2.721	26,48	0,59%	2.237
España	276,17	0,76%	44.388	329,88	0,32%	36.721
Estonia	6,19	0,79%	785	12,84	0,89%	557
Finlandia	53,30	0,79%	2.967	57,01	0,79%	2.309
Francia	672,21	0,76%	41.402	742,50	0,52%	20.291
Irlanda	35,76	0,74%	3.500	55,03	0,26%	2.195
Italia	662,55	1,02%	62.352	704,54	0,21%	56.517
Letonia	10,00	0,69%	1.443	13,90	1,46%	1.251
Países Bajos	137,10	0,45%	13.681	140,80	0,30%	5.208
Polonia	141,10	0,25%	17.576	203,78	0,82%	9.795
Portugal	64,00	1,61%	16.216	90,46	0,31%	7.214
Reino Unido	635,68	0,57%	65.254	667,53	0,46%	54.378
República Checa	59,73	0,88%	9.735	72,26	0,92%	8.382
Suecia	88,81	0,71%	6.635	114,50	0,69%	7.008
Total	3.941,77	0,81%	481.101	4.478,00	0,62%	354.094

En modelos de siniestralidad vial, Hakkert y Braimaister (2002) recomiendan utilizar una tasa en función del nivel de exposición como variable dependiente. Además, en esta línea y con

el objetivo de poder establecer comparaciones entre países, varios autores han evaluado la idoneidad de diversos indicadores de riesgo, considerando la disponibilidad de los datos a nivel europeo (Farchi *et al.*, 2006; Papadimitriou *et al.*, 2013). De los indicadores recomendados para medir el nivel de exposición, el número de viajeros-km es el único que presenta suficientes datos para todos los países y años del estudio. Por lo tanto, siguiendo las recomendaciones presentes en la literatura y los datos disponibles, en este caso de estudio se utiliza una tasa de siniestralidad como variable dependiente, definida como el número de accidentes en vías interurbanas por cada mil millones de viajeros-km. De esta forma, también se controla en la variable dependiente el factor que más contribuye a la ocurrencia de accidentes de tráfico, la exposición (Fridstrøm *et al.*, 1995), y se normaliza la variable dependiente, cumpliendo así uno de los supuestos principales del modelo lineal clásico.

Con respecto a las variables independientes, se han considerado la inversión en construcción de carreteras y el gasto en mantenimiento, como variables principales objetivo de estudio, junto con otra serie de variables de control incluidas en artículos relacionados. Respecto a las variables objetivo principal de estudio, y con el fin de obtener unos resultados comparables entre países, se expresan de forma unitaria por kilómetro de red. Esta forma de considerar los recursos económicos se puede encontrar en estudios previos (Aparicio Izquierdo *et al.*, 2013; Fridstrøm e Ingebrigtsen, 1991; Sánchez-González *et al.*, 2021; Sánchez González *et al.*, 2020, 2018).

Para tener en cuenta, de una forma aproximada, las características de la infraestructura viaria, y teniendo en cuenta los datos disponibles, se utiliza la proporción de vías de gran capacidad. La extensión de la red de gran capacidad ha mostrado tener una influencia significativa en la reducción de la mortalidad a nivel europeo (Albalate y Bel, 2012), y de la accidentabilidad en modelos nacionales (Albalate *et al.*, 2013; Aparicio Izquierdo *et al.*, 2013; Sánchez González *et al.*, 2018).

Continuando con las variables de control de factores socioeconómicos, se incluyen en el modelo las variables de: tasa de motorización, tasa de desempleo, renta per cápita y consumo de alcohol per cápita. La tasa de motorización ha sido ampliamente utilizada en la literatura como indicador del nivel de prosperidad (Albalate, 2008; Albalate *et al.*, 2013; Aparicio Izquierdo *et al.*, 2013; Castillo-Manzano *et al.*, 2015; Elvik, 2021; Nguyen-Hoang y Yeung, 2014; Sánchez-González *et al.*, 2021; Sánchez González *et al.*, 2020, 2018). Por su parte, la tasa de desempleo se usa como control de los ciclos económicos (Albalate, 2008; Albalate *et al.*, 2013; Antoniou *et al.*, 2016; Elvik, 2015; Hakim *et al.*, 1991; He, 2016; Nguyen-Hoang y Yeung, 2014; Sánchez-González *et al.*, 2021; Sánchez González *et al.*, 2020, 2018; Wegman *et al.*, 2017). Por otro lado, como forma de evaluar el nivel de desarrollo de un país se considera la renta per cápita (Bishai *et al.*, 2006; Castillo-Manzano *et al.*, 2015; Elvik, 2015; Nguyen-Hoang y Yeung, 2014; Sánchez González *et al.*, 2020; Yannis *et al.*, 2014). En cuanto al consumo de alcohol, estudios han vinculado, mediante distintos indicadores, su relación con la siniestralidad vial (Albalate, 2008; Bishai *et al.*, 2006; Castillo-Manzano *et al.*, 2017; Elvik, 2021; Fridstrøm e Ingebrigtsen, 1991; Traynor, 2009), por lo que se añade la variable de consumo de alcohol per cápita como control de este fenómeno. Según Wijnen y Rietveld (2015) los cambios socioeconómicos, representados por las variables anteriormente descritas, pueden servir para explicar ciertos mecanismos vinculados a la siniestralidad, tales como: la

distancia recorrida por los vehículos, la composición del tráfico, el comportamiento del usuario o la renovación del stock de vehículos. En la Figura 13 se muestra un diagrama causal de este vínculo.

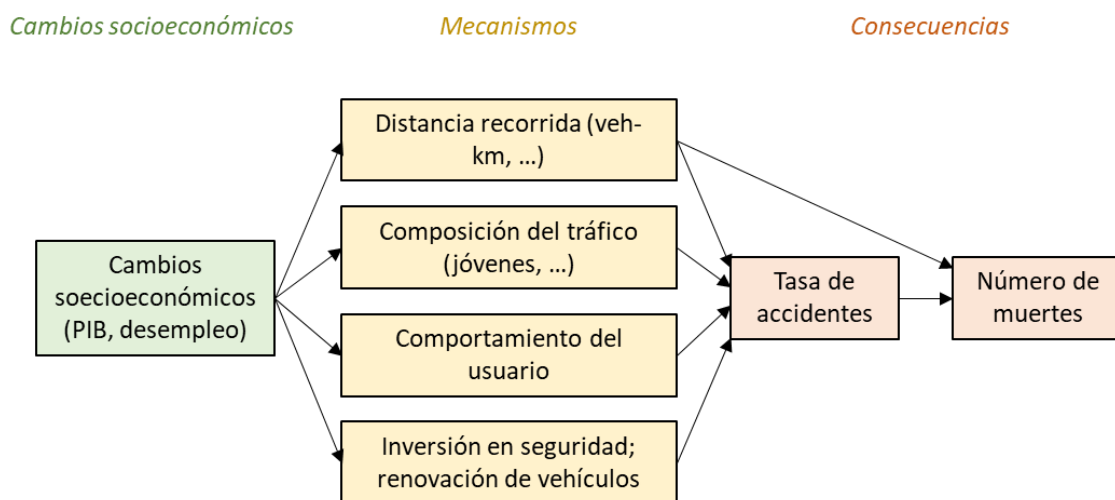


Figura 13. Diagrama causal sobre la influencia de cambios socioeconómicos en la seguridad vial.
Fuente: Adaptado de Wijnen y Rietveld (2015).

En relación a los factores meteorológicos, la precipitación es el parámetro que más se ha considerado en la literatura, ya sea mediante el análisis de datos anuales, mensuales o diarios (Aparicio Izquierdo *et al.*, 2013; Bergel-Hayat *et al.*, 2013; Eisenberg, 2004; Fridstrøm *et al.*, 1995; Fridstrøm e Ingebrigtsen, 1991; Nguyen-Hoang y Yeung, 2014; Sánchez-González *et al.*, 2021; Sánchez González *et al.*, 2020, 2018; Theofilatos y Yannis, 2014a). Por tanto, debido a la consistencia en cuanto a los efectos de la precipitación sobre la seguridad vial, se incluye esta variable como control de posibles factores meteorológicos.

Por último, como control de factores legislativos se decide incorporar la introducción del sistema de carnet por puntos (SCP). A pesar de los numerosos cambios legislativos que han afectado a la seguridad vial durante el periodo de estudio, la introducción de una SCP destaca tanto por su eficacia como por la similitud de sus objetivos. Una característica común de este tipo de sistemas en los países estudiados, es que, llegado a cierto límite de puntos, se procede a la retirada del permiso de conducción. La efectividad de este tipo de sistema ha sido estudiada en diversos estudios (Abay, 2018; Albalade, 2008; Castillo-Manzano *et al.*, 2015; Izquierdo *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2018; Zambon *et al.*, 2007). Por otro lado, no se encontró suficiente información homogénea sobre otros cambios legislativos para incluirlos adecuadamente en el presente estudio. El impacto de tales medidas a nivel macro e internacional merecería un análisis específico.

En la Tabla 7 se resume la relación de variables seleccionadas para su inclusión en el modelo, junto con la definición de las mismas y los principales estadísticos descriptivos. Respecto a las variables a usar como regresores, no se han detectado problemas de multicolinealidad. Para comprobar esta posibilidad, se han verificado tanto las correlaciones entre las variables, como el factor de inflación de la varianza.

Tabla 7. Definición de variables y estadísticos descriptivos

Variable	Definición	Media	Desv. Típ.	Mín.	Máx.
Accidentes	Accidentes con heridos por mil millones de viajeros-kilómetro	106,87	59,63	14,25	312,27
Inversión	Miles de euros por kilómetro (Constantes 2015)	20,26	35,52	0,033	279,89
Mantenimiento	Miles de euros por kilómetro (Constantes 2015)	8,15	11,14	0,25	83,76
Precipitación	mm	913,80	282,74	445,70	2266,78
Autovía	Porcentaje (%)	2,57	4,11	0,00	21,42
Motorización	Turismos por 1.000 habitantes	435,29	89,50	199,39	625,17
Desempleo	Porcentaje (%)	9,10	4,07	3,10	26,10
PIBcap	Miles de euros per cápita (Constantes 2015)	27,01	12,90	5,24	57,40
Alcohol	Litros per cápita (Edad > 15)	10,93	2,11	6,20	17,80
SCP	Ficticia (0, 1)	0,62	0,49	0	1

4.2.1.3 Modelos de regresión lineal

Como se ha visto previamente en el capítulo dos, este tipo de modelos son ampliamente utilizados en la literatura sobre seguridad vial a nivel internacional (Bishai *et al.*, 2006; Castillo-Manzano *et al.*, 2014; Economou *et al.*, 2008; Gerdtham y Ruhm, 2006; Kopits y Cropper, 2005, 2008; Paulozzi *et al.*, 2007; van Beeck *et al.*, 2000), especialmente cuando la dimensión temporal T del panel de datos abarca un periodo amplio. Dicha situación de suficiente predominancia temporal se refleja en la base de datos formulada a nivel europeo, la cual contiene información de 20 países durante 19 años consecutivos: desde 1998 hasta 2016. Por tanto, se opta por formular un modelo lineal para datos de panel cuyo objetivo es explicar los accidentes con heridos y muertos ocurridos en carreteras a lo largo del tiempo y en los países seleccionados.

Sin embargo, los modelos lineales de panel de datos cuentan con una serie de fenómenos propios que afectan a las hipótesis del modelo de regresión lineal general, los cuales deben

ser analizados con el fin de obtener estimadores robustos. Para ello, se propone la realización de una serie de test. El test de Levene (Levene, 1960) se utiliza para comprobar la homocedasticidad a lo largo del corte transversal. Para comprobar la correlación serial, se usa el test de Wooldridge (Wooldridge, 2007) en el que la hipótesis nula supone la no existencia de autocorrelación de primer orden. Y, por último, para comprobar la independencia de corte transversal, se utiliza el test de Pesaran (Pesaran, 2020), suponiendo dicha independencia en la hipótesis nula. En la Tabla 8 se muestran las hipótesis planteadas por estos test y los resultados obtenidos tras la aplicación de los mismos.

Tabla 8. Resumen de los test planteados

Hipótesis nula	Test	Resultados
Homocedasticidad a lo largo del corte transversal	Test de Levene (Levene, 1960)	$W_0 = 15,306^{***}$ $W_{50} = 9,287^{***}$ $W_{10} = 14,394^{***}$
Inexistencia de autocorrelación de primer orden	Test de Wooldridge (Wooldridge, 2007)	$F = 74,793^{***}$
Independencia de las secciones transversales	Test de Pesaran (Pesaran, 2020)	13,465 ^{***} , valor absoluto medio de la correlación de los residuos = 0,395

*** $p < 0,01$

Como consecuencia de los resultados obtenidos en los test, se considera la existencia en el panel de heterocedasticidad grupal, de autocorrelación de primer orden y de correlación contemporánea. Esta situación provoca el incumplimiento de algunos de los supuestos del modelo lineal clásico, por lo que se expone a continuación el enfoque estadístico a emplear.

4.2.1.4 Errores estándar corregidos por panel (PCSE)

Beck y Katz (1995) propusieron un método para ajustar modelos lineales de datos de panel, o, como citaban en su trabajo, de series temporales de sección cruzada (TSCS), cuando las perturbaciones no se podían asumir como independientes e idénticamente distribuidas (i.i.d.). Los autores partieron del método de Mínimos Cuadrados Generalizados Factibles (MCGF) propuesto por Parks (1967a), el cual era ampliamente utilizado en el análisis de datos de panel por dar solución a la heterocedasticidad, autocorrelación y la dependencia entre secciones. No obstante, Beck y Katz (1995) demostraron que el método de Parks (Parks, 1967) producía unos errores estándar demasiado optimistas, rechazando hipótesis con demasiada facilidad y pudiendo invalidar la inferencia estadística basada en dichos errores. Esta afirmación fue corroborada posteriormente por otros estudios (Moundigbaye *et al.*, 2018; Reed y Webb,

2010). Por tanto, como alternativa para ajustar modelos de datos de panel, y ante la presencia de heterocedasticidad grupal y correlación contemporánea, los autores propusieron estimar los modelos lineales mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) y posteriormente realizar una corrección de los errores estándares.

El modelo de este tipo, aplicado al caso de estudio, puede escribirse de la siguiente forma:

$$y_{it} = x_{it}\beta + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

En el que y_{it} representa la variable dependiente, siendo $i = 1, \dots, m$ el número de paneles (países, en este caso de estudio) y $t = 1, \dots, T_i$ el número de periodos (años) a lo largo de los paneles; x_{it} son las variables independientes, con los mismos subíndices; β es el vector de coeficientes estimables; y ε_{it} es el término de error o perturbación, el cual puede estar correlacionado a lo largo de t , o bien mostrar una correlación contemporánea a través de i .

La ecuación (1) también puede escribirse para cada panel como

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} \beta + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

En el caso de un modelo con presencia de perturbaciones heterocedásticas y correlación contemporánea, la matriz de covarianza de los errores se muestra como

$$E[\varepsilon\varepsilon'] = \Omega = \begin{bmatrix} \sigma_{11}I_{11} & \sigma_{12}I_{12} & \dots & \sigma_{1m}I_{1m} \\ \sigma_{21}I_{21} & \sigma_{22}I_{22} & \dots & \sigma_{2m}I_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{m1}I_{m1} & \sigma_{m2}I_{m2} & \dots & \sigma_{mm}I_{mm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

En el que σ_{ii} es la varianza de los errores para el panel i , σ_{ij} es la covarianza de los errores entre el panel i y el panel j para el mismo periodo temporal, e I es la matriz identidad de dimensión $T_i \times T_i$ para el caso de paneles balanceados. La matriz de covarianza de los errores también puede escribirse de la siguiente manera

$$E[\varepsilon\varepsilon'] = \Sigma_{mxm} \otimes I_{T_i \times T_i} \quad (4)$$

Donde Σ es la matriz de covarianzas por paneles, $\otimes$ es el producto de Kronecker e I es la matriz identidad.

Dado que la estimación mediante MCO de la ecuación (1) es consistente, se pueden utilizar los residuos de dicha estimación para proporcionar un estimador de Σ (Bailey y Katz, 2011). Sea $e_{i,t}$ los residuos MCO de la unidad i en el tiempo t , se pueden estimar los elementos de Σ mediante la expresión

$$\hat{\Sigma}_{i,j} = \frac{\sum_{t=1}^{T_{i,j}} e_{i,t} e_{j,t}}{T_{i,j}} \quad (5)$$

Componiéndose la estimación de $\hat{\Sigma}$ por todos estos elementos. Esto se utiliza para formar el estimador $\hat{\Omega}$, creando una matriz diagonal por bloques con las matrices $\hat{\Sigma}$ a lo largo de la diagonal. En el presente caso de estudio, puesto que se trata de un panel de datos balanceado en el que $T_{i,j} = T$, con $i = 1, \dots, N$, se puede simplificar la expresión a

$$\hat{\Sigma} = \frac{(E^T E)}{T} \quad (6)$$

En la que E es la matriz de residuos y, consecuentemente, se puede estimar Ω mediante

$$\hat{\Omega} = \hat{\Sigma} \otimes I_T \quad (7)$$

Por tanto, los errores estándar corregidos por panel se pueden calcular mediante la raíz cuadrada de los elementos de la diagonal principal de:

$$PCSE = (X^T X)^{-1} X^T \hat{\Omega} X (X^T X)^{-1} \quad (8)$$

No obstante, si bien este método permite obtener unos errores estándar robustos ante la presencia de heterocedasticidad y correlación contemporánea, Beck y Katz (1995) matizaron que para poder aplicarlo, antes debía solventarse la posible existencia de autocorrelación en las perturbaciones, así como asegurar la estacionariedad de las series temporales. Por ello, se expondrá a continuación el tratamiento de ambos temas.

4.2.1.5 Estimador de Prais-Winsten y estacionariedad de las series temporales

Ante la presencia de correlación serial en el modelo lineal, Prais y Winsten (1954) propusieron un método de estimación basado en Mínimos Cuadrados Generalizados (MCG) con una estructura autorregresiva de primer orden, en la que, a diferencia del método de Cochrane-Orcutt (Cochrane y Orcutt, 1949), se aprovechaba la primera observación.

Considerando el modelo

$$y_t = \alpha + x_t \beta + \varepsilon_t \quad (9)$$

En el que y_t es la serie temporal de interés para el tiempo t , X_t es la matriz de variables independientes, α es el término constante, β es el vector de coeficientes, y ε_t es el término de error. En este caso, el término de error puede estar correlacionado a través del tiempo de la siguiente forma:

$$\varepsilon_t = \rho \varepsilon_{t-1} + e_t \quad (10)$$

En la que $|\rho| < 1$ y e_t es el ruido blanco. El método de Prais-Winsten utiliza la transformación de Cochrane-Orcutt, que es

$$y_t - \rho y_{t-1} = \alpha(1 - \rho) + (X_t - \rho X_{t-1})\beta + e_t \quad (11)$$

Para los $t = 2, 3, \dots, T$, mientras que la técnica de Prais-Winsten realiza una transformación adicional para $t = 1$, definida según

$$\sqrt{1 - \rho^2} y_1 = \alpha \sqrt{1 - \rho^2} + \left(\sqrt{1 - \rho^2} X_1 \right) \beta + \sqrt{1 - \rho^2} e_1 \quad (12)$$

Mediante las ecuaciones (11) y (12) se transforman los datos y se obtienen nuevas estimaciones de α y β , las cuales se utilizan para obtener los valores ajustados

$$\hat{y}_t = \hat{\alpha} + x_t \hat{\beta} \quad (13)$$

Y proceder, luego, a reestimar ρ según

$$\rho = \frac{\varepsilon' \varepsilon_{t-1}}{\varepsilon' \varepsilon} \quad (14)$$

En el que ε es el vector de los residuos. Nuevamente se reestima la ecuación (11) con el nuevo valor de ρ y se continúa este proceso iterativo entre (11) y (14) hasta alcanzar la convergencia o hasta una tolerancia determinada.

Por otro lado, para asegurar la estacionariedad de las series temporales se utilizará el test de Breitung (Breitung y Das, 2005), el cual pertenece a una segunda generación de test de raíces unitarias para datos de panel que considera la correlación contemporánea de las entidades (Scott, 2008). En función de los resultados del test, y ante la existencia de alguna raíz unitaria en el panel, se procederá a diferenciar la serie hasta convertirla en estacionaria (Gujarati, 2003), lo que ocurre al realizar la primera diferencia en los casos tratados en el presente estudio.

4.2.1.6 Modelo de siniestralidad a nivel europeo

Los métodos descritos en los apartados 4.2.1.4 y 4.2.1.5 se aplicarán conjuntamente para el caso de estudio n.º 1. Es decir, se formulará un modelo de datos de panel con errores estándar corregidos, y en el que se considera una autocorrelación de primer orden específica para cada país. Así, el modelo a emplear adopta la siguiente forma:

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{1it} + \beta_2 X_{2it} + \dots + \beta_k X_{kit} + \varepsilon_{it} \quad (15)$$

en el cual, y_{it} representa la variable dependiente, con subíndices i para cada país y t por cada año. X_{kit} son las variables independientes, β_k son los coeficientes estimables. Por otro lado, se considera la presencia de perturbaciones heterocedásticas y correlación contemporánea, tales que:

$$E(\varepsilon_{it}^2) = \sigma_{ii} \quad (16)$$

$$E(\varepsilon_{it} \varepsilon_{jt}) = \sigma_{ij} \quad (17)$$

Mientras que el término de error, ε_{it} , posee la siguiente estructura autorregresiva:

$$\varepsilon_{it} = \rho_i \varepsilon_{it-1} + e_{it} \quad (18)$$

Siendo ρ_i el parámetro de autocorrelación específico para cada país y e_{it} se corresponde con los errores i.i.d.

Las variables que se utilizarán en este modelo, X_{kit} , se corresponden con las descritas en el apartado 4.2.1.2, y sus principales estadísticos descriptivos se muestran en la Tabla 7. Por otro lado, para asegurar la estacionariedad de las distintas series temporales, se procede a la comprobación de la existencia de raíces unitarias en los paneles. Para ello, y debido a la existencia de correlación contemporánea, se aplica el test de Breitung (Breitung y Das, 2005), el cual supone en la hipótesis nula la existencia de raíces unitarias y en la hipótesis alternativa la estacionariedad de los paneles. Los resultados del test, aceptan fuertemente la hipótesis nula para las variables de proporción de vías de gran capacidad (*lambda*: 1,9026, *p-valor*: 0,9715) y para la tasa de motorización (*lambda*: 1,5233, *p-valor*: 0,9362), y, en menor medida, también se acepta para el consumo de alcohol (*lambda*: -1,2979, *p-valor*: 0,0972). Así pues, para conseguir la estacionariedad de estas tres variables, se procede a diferenciarlas (Greene, 2003), considerando por tanto en el modelo, la variación anual de las mismas.

De esta forma, el modelo de accidentabilidad a nivel europeo adquiere la siguiente forma general:

$$\begin{aligned} \text{Accidentes}_{it} = & \beta_0 + \beta_1 \text{Inversión}_{it} + \beta_2 \text{Inversión.L1}_{it} + \beta_3 \text{Mantenimiento}_{it} \\ & + \beta_4 \text{Mantenimiento.L1}_{it} + \beta_5 \text{Precipitación}_{it} + \beta_6 \text{Autovia.d}_{it} \\ & + \beta_7 \text{Motorización.d}_{it} + \beta_8 \text{Desempleo}_{it} + \beta_9 \text{PIBcap}_{it} \\ & + \beta_{10} \text{Alcohol.d}_{it} + \beta_{11} \text{SCP}_{it} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (19)$$

Donde se ha añadido ‘L1’ al retardo de un año para la variable en cuestión y ‘d’ a la variable expresada como incremento anual, es decir, considerando la primera diferencia de la serie temporal.

Por último, para verificar el comportamiento de las estimaciones y poder evitar, en la medida de lo posible, un sesgo por omisión de variable, la regresión se realiza paso a paso (método *stepwise*), en el cual las variables independientes se van añadiendo una a una.

4.2.2 CASO DE ESTUDIO N.º 2: Análisis a nivel europeo según la riqueza de cada país

4.2.2.1 Definición de los grupos de países y descripción de los datos

Este caso de estudio cuenta con datos de 23 países europeos durante el periodo comprendido entre 1998 y 2016. Para conformar los dos grupos de países se ha considerado el PIB per cápita de cada país en precios constantes de 2015 para cada año durante todo el periodo de análisis. A partir de estas cifras se ha calculado el valor medio de la serie de cada país y, posteriormente, el valor medio global, el cual se establece en 30.316,33 €. Esta cantidad ha

servido para clasificar en Países de Rentas Altas (PRA) y Países de Rentas Bajas (PRB): los 12 países que tienen un PIB per cápita superior a dicha cantidad se han clasificado como PRA, mientras que los 11 restantes con un PIB per cápita inferior se han considerado PRB. Los países incluidos en cada categoría se indican en la Tabla 9.

Tabla 9. Distribución de países según grupos de riqueza

Países de Rentas Altas (PRA)	Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Francia, Irlanda, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Reino Unido y Suecia
Países de Rentas Bajas (PRB)	Croacia, República Checa, Estonia, Italia, Letonia, Lituania, Polonia, Portugal, Eslovaquia, Eslovenia y España

Una vez clasificados los países, se muestran los principales estadísticos descriptivos de las variables para cada grupo de países en la Tabla 10. Mediante esta agrupación ya se comienzan a observar algunas diferencias notables en los estadísticos de los PRA y PRB, como puede comprobarse también en la Figura 14.

Tabla 10. Estadísticos descriptivos de las variables según clasificación de los países.

	Países de Rentas Altas				Países de Rentas Bajas			
Variable	Media	Dev. Típ.	Mín	Máx	Media	Dev. Típ.	Mín	Máx
Fallecidos	4,72	2,35	1,47	12,39	10,82	6,75	2,58	35,30
Inversión	18,36	18,12	1,13	101,35	25,87	46,87	0,03	279,89
Mantenimiento	7,35	5,11	0,25	21,50	9,46	14,39	0,47	83,76
Autovia	1,76	1,60	0,11	5,65	3,30	5,30	0,00	21,42
Motorización	480,04	75,06	324,07	678,41	409,25	106,08	199,39	625,17
Desempleo	6,54	2,40	1,90	15,50	11,2	4,40	4,00	26,1
PIBcap	44,40	15,00	30,18	94,85	14,96	6,72	4,27	31,74
Alcohol	10,45	2,20	5,24	14,95	11,25	2,34	6,35	17,75
SCP	0,36	0,48	0	1	0,24	0,43	0	1
Precipitación	976,08	230,01	520,23	1548,14	860,33	316,59	445,70	2266,78

Así pues, la media de la tasa de mortalidad de los PRB es más del doble que en los PRA (Tabla 10). Por otro lado, tal y como puede observarse en la Figura 14, se aprecia una disminución generalizada y una convergencia en las tasas a lo largo del periodo de estudio.

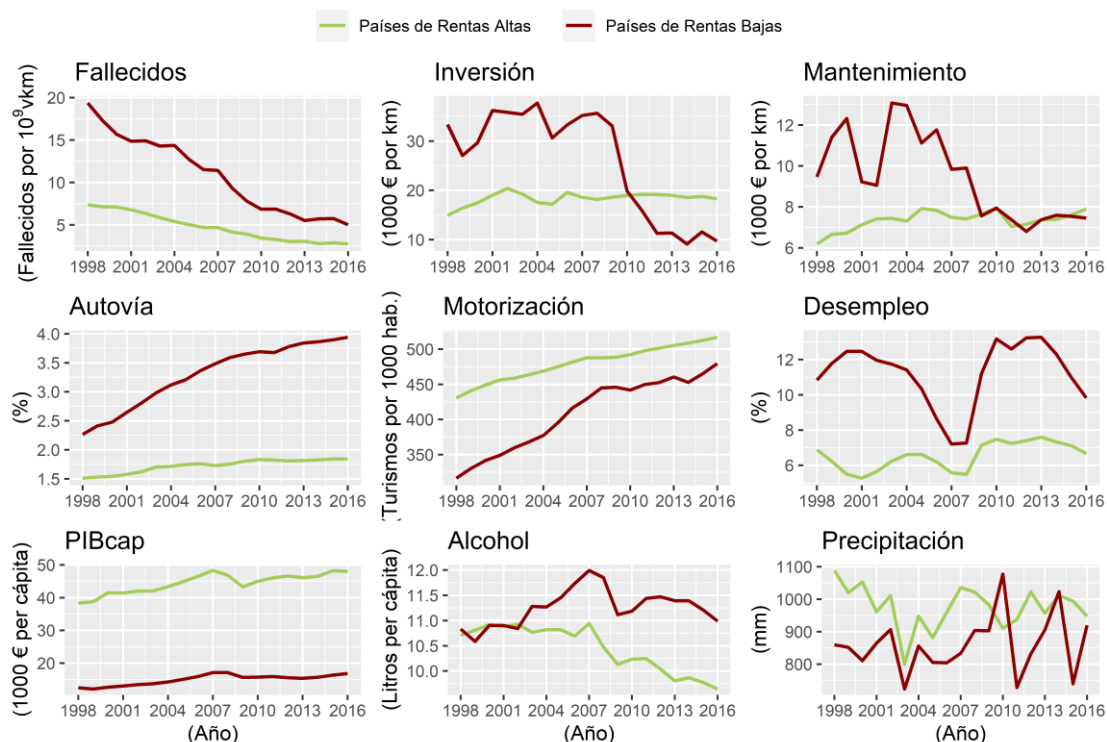


Figura 14. Evolución de los valores medios de las variables consideradas. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la inversión en construcción de carreteras, ha sido un 41% superior en los PRB durante el periodo de estudio (Tabla 10). Esto puede explicarse porque, debido a su déficit de infraestructuras, los PRB pudieron acceder a diversos mecanismos de financiación de la UE (Fondo de Cohesión), incluso durante la fase previa a su adhesión a la UE. Concretamente, durante el periodo comprendido entre los años 2000 y 2013, la UE transfirió 64.681 millones de euros a través de los Fondos de Cohesión. Estos fondos fueron destinados en su mayoría a países pertenecientes al grupo PRB (European Court of Auditors, 2013). Así pues, la Figura 14 muestra que la inversión en construcción de carreteras hasta 2010 es mucho mayor en los PRB que en los PRA: mientras que en los PRA la inversión por kilómetro se mantiene relativamente estable, en torno a los 20.000 euros, en los PRB se sitúa en torno a los 35.000 euros. En cambio, la crisis financiera de 2008 afectó especialmente a los PRB, cuya inversión unitaria cayó desde los 35.631 euros en 2008 a 9.695 euros en 2016. Por otro lado, el gasto en mantenimiento medio es un 29% mayor en los PRB (Tabla 10). También, observando la evolución de la variable, se aprecia que el gasto en mantenimiento es mayor en los PRB hasta 2008, lo cual puede deberse a la misma razón comentada anteriormente. A partir de 2009, ambos grupos de países muestran un gasto próximo a los 7.500 euros por kilómetro de red y, continuando después con unos valores muy parecidos.

Respecto a la mayor proporción de vías de gran capacidad en los PRB (un 87% más según la Tabla 10), se debe a su masiva construcción y al desdoblamiento de carreteras convencionales durante el periodo de estudio (Figura 14), siendo estas construcciones financiadas principalmente por los Fondos de Cohesión, unido a que estos países disponían previamente

de una red de carreteras menos extensa, lo que propicia que, durante el periodo de estudio, esta proporción ha aumentado mucho en este grupo de países (Schipper, 2008).

Por su parte, la tasa de motorización es un 17% mayor en los PRA (Tabla 10) al estar ésta relacionada principalmente con la renta per cápita de cada país (Kopits y Cropper, 2005; Medlock y Soligo, 2002). Respecto a su evolución a lo largo del periodo de estudio, es creciente en ambos grupos de países, aunque se observa una tendencia convergente. El crecimiento es mayor en los PRB, lo cual puede deberse a que partían de unas tasas de motorización inferiores, y al desarrollo económico que han experimentado durante el periodo de estudio. Así pues, en 1998 la tasa de motorización de los HIC superaba en 114 unidades la de los LIC, mientras que en 2016 la diferencia entre grupos se redujo hasta 37 unidades.

La tasa de desempleo es casi el doble en los PRB que en los PRA (Tabla 10). En la Figura 14 puede observarse que esta variable es muy sensible a las crisis económicas, especialmente en los PRB. Si bien hasta 2004 la variable muestra unas tendencias opuestas entre PRA y PRB, a partir de entonces, la tendencia sigue un comportamiento similar en ambos grupos, aunque la desigualdad aumenta considerablemente a partir de la crisis económica de 2008. Así pues, los PRB llegan a aumentar en un 5.97% su tasa de desempleo entre 2008 y 2013, mientras que los PRA la incrementan en menor medida: un 2.11% para el mismo periodo.

Según la Tabla 10, la renta per cápita de los PRA casi triplica la correspondiente a los PRB. Tanto los PRA como PRB alcanzan su máximo valor en 2007: 48.275 € para PRA y 17.139 para PRB (Figura 14). A partir de la crisis económica de 2008 comienza una tendencia decreciente (mayor en los PRA). Esta tendencia se invierte en los PRA a partir de 2009, mientras que en los PRB se mantienen valores cercanos al mínimo de 2009, produciéndose una recuperación a partir de 2014.

Respecto al consumo de alcohol per cápita, la Tabla 10 muestra unos valores similares en ambos grupos. No obstante, al observar la evolución del consumo medio en la Figura 14, se puede comprobar un comportamiento distinto según el grupo de países. Así pues, ambos grupos de países muestran un consumo parecido hasta 2007. Sin embargo, a partir de entonces, el consumo de alcohol en los PRA se va reduciendo paulatinamente hasta 2016. Por otro lado, en los PRB se aprecia un gran incremento del consumo hasta 2007 y una caída con la llegada de la crisis económica. No obstante, esta caída no se mantiene (como en los PRA) y se produce un repunte en el consumo de alcohol.

Respecto a la precipitación media anual, los PRA muestran una media mayor en los datos medios anuales recogidos: 976,08 mm para PRA, y 860,33 para PRB (Tabla 10). No obstante, hay que puntualizar que la agrupación de países realizada en función de la renta per cápita, engloba regiones climáticas distintas. Aun así, tanto la media como su evolución, parecen ser coherentes con la agrupación de países, ya que los PRA (que engloban a países del centro y norte de Europa) tienen más precipitaciones que los PRB (países del sur, este y oeste de Europa).

Por último, la variable ficticia SCP refleja la introducción de algún Sistema de Carnet por Puntos (SCP) durante el periodo considerado. De los PRA, 6 países aprobaron algún SCP –

Austria (2005), Dinamarca (2005), Irlanda (2002), Luxemburgo (2002), Países Bajos (2002) y Noruega (2004)–, y de los PRB, 5 de ellos –Italia (2003), República Checa (2006), Letonia (2004), Portugal (2016) y España (2006)–.

Dada la naturaleza de los datos, con dos grupos de países y durante 19 años, se opta por formular modelos para datos de panel separados con efectos fijos por país y tendencia temporal. El objetivo es explicar la tasa de fallecidos en carreteras a lo largo del tiempo y en los países seleccionados dentro de cada grupo y poder compararlos entre sí. Por otro lado, la inclusión de efectos fijos permite identificar y cuantificar el efecto de características invariantes en el tiempo no incluidas que son específicas para cada país, mientras que la inclusión de la tendencia va a permitir determinar las distintas tendencias nacionales. Al igual que para el modelo de accidentabilidad del primer caso de estudio, se han realizado una serie de test para comprobar las hipótesis homocedasticidad a lo largo del corte transversal (test de Levene (1960)), inexistencia de correlación serial de primer orden (test de Wooldridge (2007) y de independencia de corte transversal (test de Pesaran (2020))). Los resultados de estos test, en los que la hipótesis nula asume las propiedades comentadas, son fuertemente rechazados, tal y como se puede observar en la Tabla 11. Como consecuencia, se considerará la existencia de heterocedasticidad grupal, de autocorrelación de primer orden y de correlación contemporánea a la hora de formular los modelos.

Tabla 11. Test de homocedasticidad, correlación serial y dependencia de corte transversal.

	Países de Rentas Bajas		Países de Rentas Altas	
Test de Levene:	$W_0: F(10, 198)$	15,048	$W_0: F(11, 216)$	7,959
	Prob. > F =	0,000	Prob. > F =	0,000
	$W_{50}: F(10, 198)$	8,508	$W_{50}: F(11, 216)$	5,483
	Prob. > F =	0,000	Prob. > F =	0,000
	$W_{10}: F(10, 198)$	14,467	$W_{10}: F(11, 216)$	7,556
	Prob. > F =	0,000	Prob. > F =	0,000
Test de Wooldridge:	$F(1, 10) =$	126,202	$F(1, 11) =$	6,815
	Prob. > F =	0,000	Prob. > F =	0,024
Test de Pesaran:	Estadístico =	22,799	Estadístico =	14,768
	Prob. =	0,000	Prob. =	0,000
	Valor absoluto medio de los valores fuera de la diagonal =	0,725	Valor absoluto medio de los valores fuera de la diagonal =	0,535

De igual manera que en el caso de estudio n.º 1, no se cumplen los supuestos anteriores acerca de las perturbaciones del modelo lineal. No obstante, en el presente caso de estudio se ha cambiado la estructura de datos de panel, disponiendo de dos grupos en los que la dimensión transversal de países, N, es mucho más pequeña que la temporal referente a los años, T. Ante una eventual situación similar a esta y en la que la dimensión temporal (T) sea sensiblemente superior a la transversal (N), Beck y Katz (1995) advirtieron que el estimador de Parks (Parks, 1967) era más eficiente que el estimador PCSE propuesto por ellos. Además, Reed y Webb (2010) corroboraron esta afirmación y establecieron que para una relación temporal-transversal, T/N, superior a 1,5, el estimador de Parks podía ser un 40% más

eficiente. En el presente caso de estudio, dicha relación es de 1,64 para los datos correspondientes a PRB y de 1,5 para PRA. Por otro lado, al agrupar países de nivel de desarrollo económico más parecido, la correlación contemporánea ha aumentado considerablemente, tal y como reflejan las cifras de valores absolutos medios en el Test de Pesaran (Tabla 11). Reed y Webb (2010) establecieron que el incremento del 40% en la eficiencia del estimador de MCGF de Parks se daba para unos valores absolutos medios de las correlaciones contemporáneas comprendidos entre 0,25 y 0,50. Y que, a partir de un valor equivalente a 0,50, la eficiencia relativa del estimador PCSE se vería aún más disminuida. Observando los valores absolutos medios de las correlaciones contemporáneas correspondientes a los datos correspondientes a los PRB y PARA, estos son de 0,725 y 0,535, respectivamente. Por tanto, el estimador de Parks se muestra como más eficiente para formular los modelos de ambos grupos de países.

4.2.2.2 Método de Parks-Kmenta (MCGF-Parks)

El modelo de Parks (Parks, 1967), también conocido como Parks-Kmenta (Kmenta, 1986), reconoce la heterocedasticidad y correlación entre distintas entidades, a la vez que considera una estructura autorregresiva dentro la entidad. Este modelo requiere una dimensión de tiempo T superior al número de secciones transversales o entidades N . También requiere que los paneles de datos sean balanceados. Con este modelo, se asume que los términos de error de las secciones transversales poseen distintas varianzas, se relaja la asunción de independencia entre secciones y que los términos de error dentro de cada sección transversal siguen un proceso autorregresivo de primer orden.

Partiendo del modelo lineal planteado en la ecuación (15), y bajo las asunciones expresadas en el párrafo anterior, las cuales se definen según las ecuaciones (16), (17) y (18), se tiene la siguiente matriz de covarianzas para el vector de errores ε :

$$E[\varepsilon\varepsilon'] = \Omega = \begin{bmatrix} \sigma_{11}P_{11} & \sigma_{12}P_{12} & \dots & \sigma_{1m}P_{1m} \\ \sigma_{21}P_{21} & \sigma_{22}P_{22} & \dots & \sigma_{2m}P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{m1}P_{m1} & \sigma_{m2}P_{m2} & \dots & \sigma_{mm}P_{mm} \end{bmatrix} \quad (20)$$

En la que

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_j & \rho_j^2 & \dots & \rho_j^{T-1} \\ \rho_i & 1 & \rho_j & \dots & \rho_j^{T-1} \\ \rho_i^2 & \rho_i & 1 & \dots & \rho_j^{T-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_i^{T-1} & \rho_i^{T-2} & \rho_i^{T-3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Con $i = 1, 2, \dots, N$ y $j = 1, 2, \dots, N$. La matriz de covarianzas Ω se calcula mediante un procedimiento de dos etapas, y posteriormente se estima el vector de coeficientes β mediante MCG. Por tanto, en un primer paso para estimar Ω , se emplea el método de MCO para estimar β y los residuos ajustados, de forma que:

$$\hat{u} = y - X\hat{\beta}_{MCO} \quad (22)$$

Y el parámetro autorregresivo de primer orden se estima como:

$$\hat{\rho}_i = \frac{(\sum_{t=2}^T \hat{u}_{it} \hat{u}_{i,t-1})}{(\sum_{t=2}^T \hat{u}_{i,t-1}^2)} \quad (23)$$

Para eliminar la condición autorregresiva de los datos, se utiliza la siguiente transformación que considera las diferencias ponderadas:

$$y_{it}^* = \sum_{k=1}^p X_{itk}^* \beta_k + u_{it}^* \quad (24)$$

El segundo paso del procedimiento de estimación de la matriz Ω consiste en aplicar MCO al modelo transformado, de manera que se obtiene:

$$\hat{u}^* = y^* - X^* \beta_{MCO}^* \quad (25)$$

A partir del cual, se calcula el estimador consistente de σ_{11} como:

$$s_{ij} = \frac{\hat{\phi}_{ij}}{(1 - \hat{\rho}_i \hat{\rho}_j)} \quad (26)$$

Siendo,

$$\hat{\phi}_{ij} = \frac{1}{(T-p)} \sum_{t=1}^T \hat{u}_{it}^* \hat{u}_{jt}^* \quad (27)$$

Por otro lado, se estiman los coeficientes de β mediante MCGF:

$$\hat{\beta}_p = (X' \hat{\Omega}^{-1} X)^{-1} X' \hat{\Omega}^{-1} y \quad (28)$$

El estimador de MCGF sustituye Ω , que generalmente es desconocida, por una estimación suya, $\hat{\Omega}$, lo que lo diferencia principalmente del estimador de MCG.

4.2.2.3 Errores estándar tipo Driscoll-Kraay

Sin embargo, tal y como afirmaban Beck y Katz (1995), y fue corroborado posteriormente por otros estudios (Moundigbaye *et al.*, 2018; Reed y Webb, 2010), el método basado en MCGF propuesto por Parks produce unos errores estándares poco realistas, lo que lleva a rechazar hipótesis con demasiada facilidad. Por consiguiente, esta situación puede invalidar la inferencia estadística basada en dichos errores estándar.

Hoechle (2007) demostró que, más allá de la heterocedasticidad, cuando los residuos de una regresión de panel presentan correlación contemporánea (como ocurre en el presente caso de estudio), los estimadores de la matriz de covarianza, ya sean éstos agrupados ('pooled') o de efectos fijos, producen unos errores estándar muy sesgados a la baja. Por tanto, el autor propone que la inferencia estadística debe estar basada en el estimador Driscoll-Kraay (Driscoll y Kraay, 1998). Este estimador se adapta a formas muy generales de dependencia transversal y temporal. Adicionalmente, el estimador de la matriz de covarianza es consistente, independientemente de la dimensión transversal N , lo cual elimina algunas deficiencias de los estimadores PCSE y MCGF-Parks (las propiedades de muestra finita del estimador PCSE empeoran a medida que aumenta la dimensión transversal N en comparación con la T , mientras que el estimador de MCGF-Parks no se puede aplicar cuando la dimensión N es superior a la T).

Por ello, dado que para ambos grupos de países no solo se debe considerar la correlación contemporánea, sino que ésta presenta unos valores relativamente altos (Tabla 11), se estimarán los errores estándar tipo Driscoll-Kraay (Driscoll y Kraay, 1998), los cuales también son robustos ante la presencia de heterocedasticidad y correlación serial. De esta forma, se pretende garantizar la inferencia estadística de los resultados.

Considerando el modelo lineal planteado en la ecuación (15), y bajo las asunciones de correlación contemporánea, heterocedasticidad y correlación serial, definidas según las ecuaciones (16), (17) y (18), el vector de coeficientes β se puede estimar de forma consistente mediante una regresión de MCO, tal que

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y. \quad (29)$$

Mientras que los errores estándar tipo Driscoll-Kraay para los coeficientes estimados se obtienen a partir de las raíces cuadradas de los elementos de la diagonal principal de la matriz de covarianzas asintótica (Hoechle, 2007):

$$V(\hat{\beta}) = (X'X)^{-1}\hat{S}_T(X'X)^{-1}, \quad (30)$$

en la que $\hat{S}_T$ se define como (Newey y West, 1994):

$$\hat{S}_T = \hat{\Omega}_0 + \sum_{j=1}^{m(T)} \omega(j, m) [\hat{\Omega}_j + \hat{\Omega}_j'], \quad (31)$$

siendo $m(T)$ el retardo hasta el cual los errores están correlacionados y

$$\omega(j, m(T)) = 1 - \frac{j}{m(T) + 1} \quad (32)$$

suaviza la muestra de la función de autocovarianza de forma que el peso de los retardos de mayor orden va disminuyendo. Por otro lado, la matriz $\hat{\Omega}_j$ se define como:

$$\hat{\Omega}_j = \sum_{t=j+1}^T h_t(\hat{\beta})h'_{t-j}(\hat{\beta}), \quad (33)$$

con

$$h_t(\hat{\beta}) = \sum_{i=1}^{N(t)} h_{it}(\hat{\beta}). \quad (34)$$

Respecto al tratamiento de la correlación serial, el estimador de Driscoll-Kraay plantea un proceso de Medias Móviles (MA) en lugar de un proceso autorregresivo (AR), como se ha visto anteriormente en el caso de PCSE o MCGF-Parks. Cabe destacar, que los procesos AR son aproximables mediante un orden finito de procesos MA. A la hora de seleccionar el número de retardos del proceso MA, se utilizará el primer paso planteado el procedimiento de Newey y West (1994) para fijar la longitud de retardos $m(T)$, mediante el cual se redondea hacia abajo la siguiente expresión:

$$m(T) = 4 \left(\frac{T}{100} \right)^{\frac{2}{9}}. \quad (35)$$

Por otro lado, los valores de autocorrelación utilizados en las simulaciones de Monte Carlo realizadas por Hoechle (2007) para comprobar la tasa de cobertura del estimador Driscoll-Kraay son relativamente bajos, con un valor máximo de media igual a 0,32. A pesar de ello, los resultados muestran que el impacto adicional de la autocorrelación sobre las tasas de cobertura de los coeficientes estimados es relativamente bajo cuando también hay correlación contemporánea. Aun así, no se debe descuidar el posible impacto de una correlación serial más fuerte que la empleada en dicho estudio.

4.2.2.4 Modelo a nivel europeo según riqueza de países

A pesar de las limitaciones en cuanto a la inferencia estadística, derivada de unos errores estándar poco realistas (Beck y Katz, 1995; Moundigbaye *et al.*, 2018; Reed y Webb, 2010), bajo ciertas condiciones en las que la dimensión temporal T es ampliamente superior al número de entidades N , concretamente cuando la relación T/N es superior a 1,5, el método de Parks (Parks, 1967) es el estimador más eficiente que considera heterocedasticidad grupal, correlación contemporánea y la correlación serial (Reed y Webb, 2010). Debido a que esta condición se cumple en los planteamientos del caso de estudio n.º 2, el método de Parks se utilizará de forma intermedia para realizar estimaciones de los parámetros y comprobar el comportamiento de éstos. No obstante, las limitaciones en relación a la inferencia estadística, hacen necesario utilizar otro método más robusto para el cálculo de los errores estándar, por lo que también se utilizará el método de Driscoll-Kraay (Driscoll y Kraay, 1998). Por otro lado, tal y como se ha visto en el apartado 4.2.2.3, Hoechle (2007) demostró la robustez del estimador de Driscoll-Kraay bajo unas condiciones de correlación serial relativamente baja. Por tanto, en los modelos a estimar se decide incorporar una tendencia lineal propia por cada

país que cumpla una doble función: por un lado, controlar y rebajar los valores de autocorrelación de los residuos; y, por otro lado, cuantificar los factores no observados que afectan a la mortalidad y que cambian en el tiempo. Asimismo, y siguiendo este enfoque propio del modelo de efectos fijos, también se incorporará una variable que represente la heterogeneidad no observada e invariante de cada país, lo que también permitirá identificar y cuantifica este tipo de efecto fijo propio de cada país. Este tipo de modelo se suele denominar MCO con variables ficticias (LSDV por sus siglas en inglés, *Least Squares Dummy Variable*), a pesar de que la parte del nombre correspondiente a “MCO” hace referencia a la técnica comúnmente utilizada, no al modelo en sí (Greene, 2012). Este tipo de modelo es equivalente al modelo de regresión de efectos fijos (Baltagi, 2005), y puesto que no realiza una transformación de las variables a la hora de realizar la estimación, permite retener los valores estimados para los efectos fijos.

Así, el modelo de panel de datos planteado para cada grupo de países adopta la siguiente forma:

$$y_{it} = \beta_k X_{Kit} + \alpha_i + \tau_i T_t + \varepsilon_{it} \quad (36)$$

en el cual, y_{it} representa la variable dependiente, con subíndices i para cada país y t por cada año, α_i son variables ficticias por país, X_{Kit} son las variables explicativas indicadas en la Tabla 10, β_k son sus coeficientes estimables, T_t la tendencia lineal, τ_i la pendiente de la tendencia característica de cada país, y ε_{it} el término de error. En el caso de los modelos planteados según el método de Parks, el término de error sigue una estructura autorregresiva de primer orden AR(1) :

$$\varepsilon_{it} = \rho_i \varepsilon_{it-1} + e_{it} \quad (37)$$

siendo ρ_i el parámetro de autocorrelación específico para cada país y e_{it} se corresponde con los errores independientes e idénticamente distribuidos. Mientras que, el estimador de Driscoll-Kraay considera la correlación serial a través de un proceso de medias móviles MA(q) aplicado según las ecuaciones (31) y (32), con un número de retardos definido por la ecuación (35).

Por tanto, los modelos de mortalidad a nivel europeo adquieren las siguientes formas generales de acuerdo al grupo de países a considerar (PRA o PRB):

$$\begin{aligned} \text{Fallecidos}_{PRA,it} = & \beta_1 \text{Inversión}_{PRA,it} + \beta_2 \text{Inversión}_{PRA,it} \cdot L1 + \beta_3 \text{Mantenimiento}_{PRA,it} \\ & + \beta_4 \text{Mantenimiento}_{PRA,it} \cdot L1 + \beta_6 \text{Autovia}_{PRA,it} \cdot d \\ & + \beta_7 \text{Motorización}_{PRA,it} \cdot d + \beta_8 \text{Desempleo}_{PRA,it} + \beta_9 \text{PIBcap}_{PRA,it} \\ & + \beta_{10} \text{Alcohol}_{PRA,it} \cdot d + \beta_{11} \text{SCP}_{PRA,it} + \beta_5 \text{Precipit}_{PRA,it} + \alpha_i + \tau_i T_t + \varepsilon_{it}, \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \text{Fallecidos}_{PRB,jt} = & \beta_1 \text{Inversión}_{PRB,jt} + \beta_2 \text{Inversión}_{PRB,jt} \cdot L1 + \beta_3 \text{Mantenimiento}_{PRB,jt} \\ & + \beta_4 \text{Mantenimiento}_{PRB,jt} \cdot L1 + \beta_6 \text{Autovia}_{PRB,jt} \cdot d \\ & + \beta_7 \text{Motorización}_{PRB,jt} \cdot d + \beta_8 \text{Desempleo}_{PRB,jt} + \beta_9 \text{PIBcap}_{PRB,jt} \cdot d \\ & + \beta_{10} \text{Alcohol}_{PRB,jt} \cdot d + \beta_{11} \text{SCP}_{PRB,jt} + \beta_5 \text{Precipit}_{PRB,jt} + \alpha_j + \tau_j T_t + \varepsilon_{jt}, \end{aligned} \quad (39)$$

Siendo $i = 1, 2, \dots, 12$, $j = 1, 2, \dots, 11$ y $t = 1999, 2000, \dots, 2016$, mientras que, 'L1' indica que se ha considerado el retardo de un año para la variable en cuestión y 'd' que se ha tomado la primera diferencia de la serie temporal, es decir, la variable se expresa como incremento anual.

Para cada grupo de países se han estimado cuatro modelos de forma secuencial, los tres primeros mediante el método de MCGF-Parks y el cuarto, para garantizar la inferencia estadística, según el método de Driscoll-Kraay. En el primer modelo, solo se consideran las variables relativas a las inversiones destinadas a carreteras. En el segundo modelo, se incorporan el resto de variables independientes. El tercer modelo incluye una tendencia lineal característica de cada país y efectos fijos por país. Por último, el cuarto modelo replica el modelo anterior, pero siendo estimado según el método de Driscoll-Kraay.

4.2.3 CASO DE ESTUDIO N.º 3. Análisis de siniestralidad vial de motocicletas en España

4.2.3.1 El contexto español

En España, a diferencia de otros países de la UE15 que ya se encontraban en un proceso de reducción de víctimas mortales en carretera, la cifra de fallecidos continuó aumentando desde los años 60 hasta 1989, fecha en la que se alcanza el máximo histórico con un total de 9.344 muertes (Figura 9). Esta tendencia, opuesta a la general observada en los países de la UE15, puede explicarse en parte por el diferencial adverso en el nivel de desarrollo económico que España tenía en esas décadas y por el incremento de movilidad que estaba experimentando el país (Abellán Perpiñán *et al.*, 2011).

No obstante, a partir de 1989 comienza un nuevo periodo de mejora en la seguridad vial. En dicho año, se aprobó el primer Plan de Seguridad Vial Anual (con continuidad hasta 2005) y se sentaron las bases¹¹ de la que sería la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial¹², la cual posteriormente conduciría al Reglamento General de Circulación¹³ de 1992. Este nuevo contexto normativo y estratégico condujo a una gran reducción de las muertes en carretera hasta el año 1994. Sin embargo, durante los diez años siguientes, desde 1994 hasta 2004, el número de muertes se estabilizó en el rango comprendido entre 5.500 y 6.000.

¹¹ Ley 18/1989, de 25 de julio.

¹² Real Decreto Legislativo 339/1990, de 2 de marzo.

¹³ Real Decreto 13/1992, de 17 de enero.

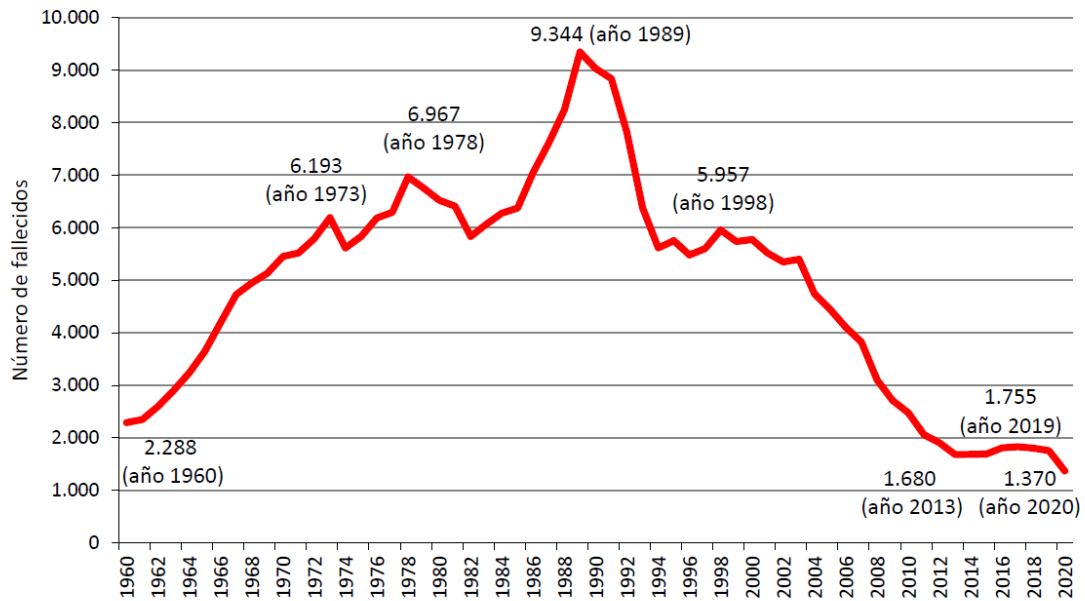


Figura 15. Fallecidos en accidente de tráfico en España, 1960-2020. Fuente: DGT (2022a).

Por otro lado, en 2004 comienza un nuevo periodo de reducción de la siniestralidad vial en España. Las orientaciones y objetivos del tercer programa de acción europeo de seguridad vial se trasladaron al ámbito español mediante el Plan Estratégico de Seguridad Vial 2005-2008, si bien las Medidas Especiales de Seguridad Vial 2004-2005 se pueden considerar precursoras de éste, puesto que dichas medidas se incluirían en él (Ministerio de Presidencia, 2009). En este nuevo plan estratégico se marcó el objetivo de reducir en un 40% el número de fallecidos para 2008, tomando como referencia las cifras del año 2003 y alineándose con el objetivo europeo de reducción del 50% para 2010 (DGT, 2005). Finalmente, en España se consiguió superar dicho objetivo en 2010, alcanzando una reducción del 55% para el periodo 2001-2010, mientras que la media europea fue del 43% (ETSC, 2011). Tras el éxito de esta década, y en sintonía con el contexto europeo, la Estrategia de Seguridad Vial 2011-2020 propuso un nuevo objetivo de reducción del número de fallecidos del 50% para 2020 (DGT, 2011). Aunque, tal y como se puede apreciar en la Figura 15, la tendencia favorable de mejora se detuvo en 2013 y comenzó un periodo de estancamiento que duró hasta 2019, puesto que en el año 2020 se produjo un brusco descenso de las cifras de mortalidad (22%) motivado, en gran parte, por las restricciones de movilidad asociadas a la pandemia de COVID-19. Aun así, la cifra alcanzada en 2020 de 1.370 muertes supone una diferencia del 33% respecto a la de 2011, por lo que el objetivo propuesto para el final de década no se alcanzó (DGT, 2022a). De todos modos, tras la Declaración de Valeta y la aprobación de la nueva Estrategia de Seguridad Vial 2030 se ratifica un objetivo intermedio de reducción del número de víctimas mortales y heridos graves en un 50% para 2030, a la vez que se afianza el enfoque de Sistema Seguro en el marco estratégico y el objetivo principal de Visión Cero con vistas al año 2050 (Council of the European Union, 2017; DGT, 2022c).

Por otro lado, una creciente preocupación en las diversas estrategias de seguridad vial han sido los usuarios vulnerables, dentro de los que se encuentran los V2RM. En la actual estrategia de seguridad vial europea se hace especial hincapié en el hecho de que los V2RM representan el 17% del total de fallecidos, a pesar de que la distancia recorrida por estos vehículos supone tan solo un 2% del total (European Commission, 2020). La Comisión Europea también destaca, en el mismo documento, la disparidad de porcentajes existente entre los distintos países. Atendiendo a esta disparidad, España es uno de los países que presenta proporciones más altas de siniestralidad de V2RM, con unos valores cercanos al 34% del total de fallecidos (DGT 2019). Mientras que la siniestralidad vial general inició una tendencia decreciente en 2003, lo contrario ocurrió para los usuarios de motocicletas y ciclomotores, viéndose un aumento de fallecimientos en este tipo de usuarios del 77% durante el periodo 2003-2007. Esta situación fue la que motivó la creación en 2007 del Plan Estratégico para la Seguridad Vial de Motocicletas y Ciclomotores (DGT, 2007). A partir de 2008, las cifras de accidentes con víctimas (en ámbito interurbano) comenzaron a descender desde las 8.296 de ese año hasta las 6.165 en 2012, tal y como se muestra en la Figura 16. De forma paralela, el número de fallecidos también disminuyó en mayor medida, alcanzando una reducción del 46% durante el periodo 2008-2012. No obstante, a partir de 2013 comienza nuevamente un periodo de incremento en el número de accidentes que se prolongará hasta 2019, interrumpiéndose por el brusco descenso de 2020. Por otra parte, la mortalidad continuó reduciéndose hasta el año 2014, a partir del cual, se inicia un periodo de tendencia ascendente que también se ve interrumpido por las cifras de 2020. Cabe resaltar nuevamente, la excepcionalidad del año 2020 debido a las numerosas restricciones de movilidad impuestas en el territorio español, lo que hace difícilmente comparable las cifras de dicho año con las del resto de la serie temporal. En este contexto de empeoramiento, tanto de la siniestralidad de los V2RM como de su mayor peso en las cifras generales de mortalidad, se aprobó el Plan de medidas especiales para la seguridad vial de motocicletas y ciclomotores 2019-2020 (DGT 2019), el cual incide en la necesidad de aplicar medidas concretas para construir una infraestructura más autoexplicativa, visible y tolerante con el error humano. La vigente Estrategia de Seguridad Vial 2030 da continuidad a las medidas propuestas por el plan específico de motocicletas y ciclomotores anterior.

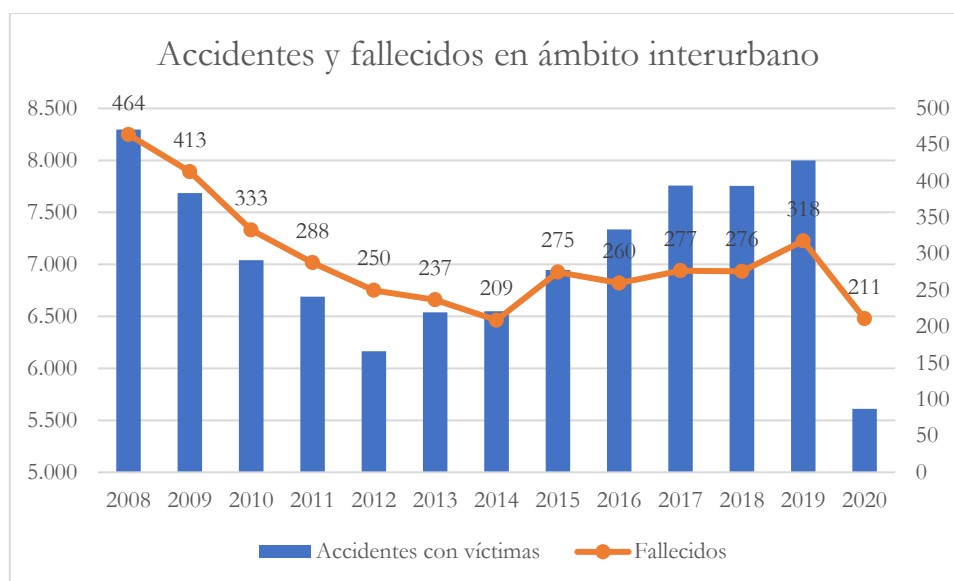


Figura 16. Evolución de la siniestralidad de motocicletas y ciclomotores en ámbito interurbano, 2008-2020. Fuente: elaboración propia a partir de informes sobre siniestralidad vial de la DGT.

Respecto a la evolución de los recursos económicos destinados a las carreteras, resulta imprescindible contextualizar las inversiones con los distintos ciclos económicos que se han producido en España desde mediados de los años 90, con especial hincapié en la crisis económica de 2008. Según el Banco de España (2017), tras un periodo de catorce años de expansión económica (1994-2007), la Gran Recesión afectó a la economía española en dos periodos consecutivos: un primer periodo marcado por la crisis financiera global (2008-2011); y, un segundo periodo marcado por el recrudecimiento de la crisis de deuda soberana (2012-2013). Finalmente, en 2014 comienza una situación de normalización e inicio de recuperación económica, en la que el PIB perdido durante la crisis se vería recuperado en el segundo trimestre de 2017. No obstante, este largo periodo de crisis económica afectó especialmente al sector de la construcción, tanto privada como obra pública. En la Figura 17 se muestra la evolución de la inversión en equipo y en construcción, desglosada en vivienda y otras construcciones (obra pública).

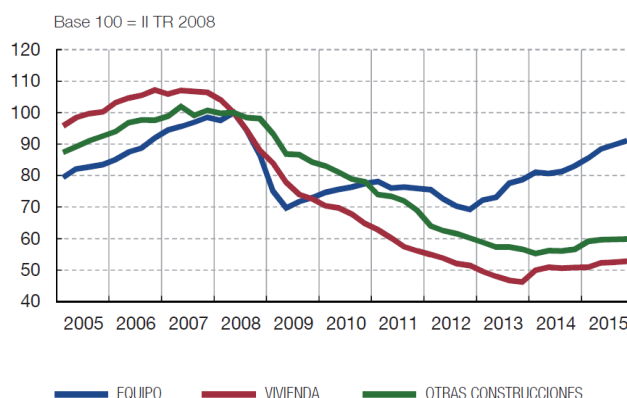


Figura 17. Inversión en equipo y en construcción, 2005-2015. Fuente: Banco de España (2017).

Tanto la inversión en equipo como el consumo comienzan a mostrar crecimiento desde comienzos del 2013, mientras que la inversión en construcción, tanto de vivienda como otras construcciones (obra pública), se mantiene en niveles por debajo del 60% de la inversión realizada en 2008. De forma específica para la red de carreteras, en la Figura 18 se muestra la evolución de las inversiones realizadas durante el periodo 2000-2019, desglosada según organismo inversor: entes territoriales (Diputaciones y Comunidades Autónomas), sociedades concesionarias de autopistas de peaje, entidades públicas empresariales (SEIT, S.A.) y Estado (ejecutadas principalmente por la D.G. de Carreteras).

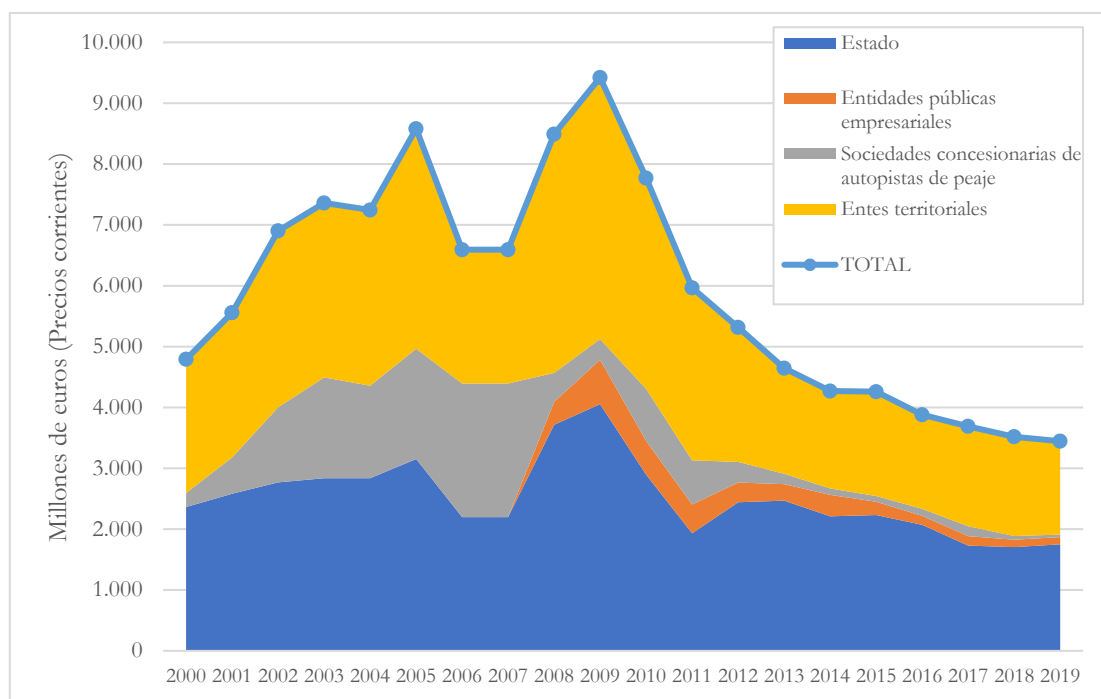


Figura 18. Evolución de las inversiones realizadas en la infraestructura viaria española según organismo inversor, 2000-2019. Fuente: elaboración propia a partir de anuarios estadísticos del MITMA (2021a).

Desde el año 2000, y coincidiendo con el ciclo económico expansivo, la inversión total destinada a la red de carreteras (tanto a construcción como a mantenimiento) fue incrementándose hasta alcanzar los 9.422 millones de euros en 2009. Este pico de inversiones se produjo un año después del comienzo de la crisis económica de 2008, como parte de una primera respuesta de política económica expansiva, la cual dio un cambio drástico de orientación en 2010, pasando a ser contractiva (Banco de España, 2017). Mientras que la economía española, a nivel general, comienza un proceso de normalización en 2014, en el que el PIB recupera el valor perdido durante el periodo de crisis en 2017, el gasto en la infraestructura viaria se ha ido conteniendo progresivamente hasta los últimos datos disponibles de 2019. De hecho, la inversión total efectuada en 2019, por valor de 3.445 millones de euros, no solo es sustancialmente inferior a la 2009, sino que continúa situándose por debajo de la efectuada en el año 2000.

Dentro de este contexto actual, se pone cada vez más en evidencia la necesidad de profundizar sobre los factores influyentes en la siniestralidad vial de los V2RM (en los que se incluyen motocicletas), de forma que se pueda actuar sobre ellos y mejorar la seguridad de este tipo de usuarios, especialmente vulnerables. Por ello, el caso de estudio n.º 3 pretende ampliar el conocimiento sobre estos factores, principalmente, sobre la relación entre los recursos económicos destinados a carreteras y la siniestralidad de motocicletas.

4.2.3.2 Selección de variables

La variable dependiente a considerar es el número de accidentes de motocicletas ocurridos en la RCE en cada provincia y año. De forma similar a los casos de estudio n.º 1 y n.º 2, Hakkert y Braimaister (2002) recomiendan utilizar una medida de exposición que permita hacer comparable el riesgo de accidente entre diferentes regiones de un mismo país. En este sentido, Papadimitriou *et al.* (2013) establecieron que la mejor medida de exposición al riesgo capaz de capturar las variaciones del tráfico es veh-km. Por tanto, para reflejar las variaciones espaciales y temporales que tienen lugar en la ocurrencia de accidentes, se incluyen los veh-km recorridos por motocicletas.

Como principales variables independientes objeto de estudio, se incorporan tres medidas de los recursos económicos destinados a carreteras: inversión en construcción acumulada durante los últimos 10 años, inversión en construcción anual y gasto en mantenimiento actual. Tal y como apuntan Nguyen-Hoang y Yeung (2014), el objetivo de incluir la inversión acumulada en construcción es poder obtener los efectos marginales que producen las nuevas inversiones. Todas las variables de inversión en carreteras se han homogeneizado dividiéndolas entre los kilómetros de red de cada provincia, para hacerlas comparables entre sí.

Por otro lado, se añaden una serie de variables independientes de control relativas al tráfico, la composición de la red de carreteras, socioeconómicas, meteorológicas y legislativas que han demostrado tener influencia sobre la ocurrencia de accidentes en la literatura de seguridad vial.

Los conductores de V2RM pueden encontrar en el flujo de tráfico mixto una serie de conflictos potenciales con otros usuarios de la vía. En líneas generales, Wulf *et al.* (1989) destacaron que los conductores de otros vehículos, al no estar acostumbrados a la presencia de motos (debido a que en países de ingresos altos la cantidad de veh-km correspondientes a V2RM es mucho menor que la de otros vehículos), fallan a la hora de detectarlas, lo que puede generar conflictos y accidentes. De hecho, este tipo de error de observación comúnmente denominado “miré, pero no lo vi” (*‘looked but failed to see’*, en la literatura inglesa) suele aparecer como factor contribuyente en la ocurrencia de accidentes. Algunos autores como Brown *et al.* (2021) y Morris *et al.* (2018) han llegado a establecer que en más de un tercio de los accidentes de V2RM aparece este factor. Por ello, se incluirán dos variables independientes que sirvan de aproximación a la heterogeneidad del tráfico: los volúmenes de vehículos ligeros y pesados.

En cuanto a la infraestructura viaria, la longitud total en 2015 de la red analizada era de 26.394 km, de los cuales 11.942 corresponden a vías de gran capacidad y 14.428 a carreteras convencionales. Numerosos estudios previos han hallado diferencias en la tasa de riesgo de sufrir un accidente según el tipo de vía, como por ejemplo: Abdul Manan *et al.* (2013), Eustace *et al.* (2011), Shaheed *et al.* (2013), Shankar y Mannering (1996) o Walker *et al.*, (2011). En líneas generales, Li *et al.* (2009) señalaron que la mortalidad de motociclistas suele ser superior conforme aumenta la capacidad y velocidad de la vía. No obstante, es esperable que esta relación cambie si se considera la exposición al riesgo y solo se atiende a la accidentabilidad, sin entrar a evaluar el grado de severidad del accidente. En cualquier caso, resulta necesario incluir una medida de la composición de la red viaria. Por ello, se considera la proporción de vías de gran capacidad.

Como ya se ha visto en los anteriores casos de estudio, la relación entre las fluctuaciones económicas y la seguridad vial ha sido estudiada en profundidad. De forma general, se puede observar una relación reductora de los ciclos económicos adversos sobre los índices de siniestralidad (Elvik, 2015; Wegman *et al.*, 2017; Wijnen y Stipdonk, 2016). Algunos estudios, como los de French y Gumus (2014), Pulido *et al.* (2021) y Wilson *et al.* (2009), también han comprobado esta relación de forma específica para V2RM, la cual se manifiesta principalmente a través de los cambios en la movilidad derivados de los ciclos económicos. Además de este motivo, Wijnen y Stipdonk (2016) señalaron que las variables socioeconómicas pueden servir de aproximación a diversos mecanismos influyentes en la seguridad vial, como son la composición del tráfico o el parque de vehículos, entre otros. Así pues, para tratar de reflejar las características socioeconómicas del área de estudio, se incluyen las variables independientes de tasa de desempleo, precio de la gasolina y Producto Interior Bruto (PIB) per cápita.

Por otro lado, dentro de los factores de riesgo relacionados con el comportamiento, la edad es señalada como uno de los principales (Dubois *et al.*, 2020; Geedipally *et al.*, 2011; Hefny *et al.*, 2012; Keall y Newstead, 2012; Law *et al.*, 2009; Rolison *et al.*, 2013; Theofilatos y Yannis, 2014b; Xin *et al.*, 2017a; Yannis *et al.*, 2005), por lo que también se tiene en cuenta.

Los factores meteorológicos se suelen considerar en los estudios de V2RM por su relación bien con el estado de la superficie de rodadura —generalmente, seco o mojado— (Alnawmasi y Mannering, 2019; de Lapparent, 2006; Eustace *et al.*, 2011; Jung *et al.*, 2013; Quddus *et al.*, 2002; Schneider y Savolainen, 2011; Shaheed y Gkritza, 2014; Shankar y Mannering, 1996; Wang *et al.*, 2016; Waseem *et al.*, 2019) o bien como una medida indirecta de la exposición —vinculada a que las condiciones climáticas favorezcan o perjudiquen la elección de los V2RM como medio de transporte— (Branas y Knudson, 2001; French y Gumus, 2014; Houston y Richardson, 2008; McCartt *et al.*, 2011; Morris, 2006; Shaheed *et al.*, 2013; Wilson *et al.*, 2009). Dentro de estos factores, la precipitación destaca como el más representativo, tanto por el efecto disuasorio en los conductores como por su influencia en la superficie de rodadura. Así pues, se incluye en el presente caso de estudio como variable independiente.

Por último, se consideran aspectos legislativos que han sido modificados durante el periodo de estudio y afectan a la circulación de las motocicletas. Estos cambios se incluyen como tres variables ficticias, las cuales hacen referencia a la entrada en vigor de las siguientes

modificaciones regulatorias: 1) la reforma del Código Penal¹⁴, en 2007; 2) la modificación del Sistema de Carnet por Puntos y del procedimiento sancionador^{15,16}, en 2009; y, 3) la reducción transitoria del límite genérico de velocidad en autopistas y autovías¹⁷, en 2011. Esta última medida estuvo enfocada desde el punto de vista del ahorro energético, y tuvo una vigencia de solo dos meses.

Para la formación de la base de datos correspondiente a estas variables, se han obtenido datos de 43 provincias españolas durante el periodo 2007-2015, lo que forma un panel de datos balanceado con un total de 387 observaciones. En la Tabla 12 se muestran las definiciones de las variables junto con sus unidades.

Tabla 12. Definición y fuentes de las variables seleccionadas para explicar los accidentes de motos.

Variable	DEFINICIÓN	Unidad
Accidentes	Accidentes con heridos	Número
Exposición	Distancia total recorrida por motos	Millones de Veh-Km
Stock	Inversión en construcción acumulada por kilómetro. Año en curso y 9 anteriores, con tasa de depreciación del 2%.	Miles de €/Km (Constantes 2015)
Inversión	Inversión en construcción por kilómetro	Miles de €/Km (Constantes 2015)
Mantenimiento	Gasto en mantenimiento por kilómetro	Miles de €/Km (Constantes 2015)
Ligeros	Longitud total recorrida por vehículos ligeros	Millones de Veh-Km
Pesados	Longitud total recorrida por vehículos pesados	Millones de Veh-Km
Autovía	Proporción de vías de gran capacidad	%
PIBcap	PIB per cápita	Miles de € (Constantes 2015)

¹⁴ Ley Orgánica 15/2007, de 30 de noviembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 10/1995, de 23 de noviembre, del Código Penal en materia de seguridad vial.

¹⁵ Real Decreto 818/2009, de 8 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento General de Conductores.

¹⁶ Ley 18/2009, de 23 de noviembre, por la que se modifica el texto articulado de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, aprobado por el Real Decreto Legislativo 339/1990, de 2 de marzo, en materia sancionadora.

¹⁷ Real Decreto 303/2011, de 4 de marzo, por el que se modifican el Reglamento General de Circulación, aprobado por el Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre, y el Texto Articulado de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, aprobado por el Real Decreto Legislativo 339/1990, de 2 de marzo, y se reduce el límite genérico de velocidad para turismos y motocicletas en autopistas y autovías.

Variable	DEFINICIÓN	Unidad
Edad	Edad mediana	Años
Desempleo	Tasa de desempleo	%
Gasolina	Precio de la gasolina	Cts.€ / litro (Constantes 2015)
Precipitación	Precipitación anual	mm
Penal	Reforma del Código Penal (LO 15/2007)	Ficticia. 1 para los años 2008 y 2009, 0 el resto
SCP	Modificación del procedimiento sancionador (Ley 18/2009) y modificación del reglamento de circulación (RD 818/2009).	Ficticia. 1 para los años 2010-2013, 0 el resto
Velocidad	Reducción del límite genérico de velocidad (medida temporal) (RD 303/2011).	Ficticia. 1 para el año 2011, 0 el resto

En la Tabla 13 se muestran los principales estadísticos descriptivos. Las variables monetarias han sido convertidas a precios constantes de 2015 utilizando dos índices: índice de coste de la construcción para la ingeniería civil del MITMA (para las variables relativas a inversiones en carreteras) y el Índice de Precios de Consumo (para el PIB per cápita y precio de gasolina).

Tabla 13. Principales estadísticos descriptivos de las variables.

Variable	N	Media	Dev. Est.	Mín	Máx
Accidentes	387	36,91	45,39	2,00	271,00
Exposición	387	20,11	26,59	1,92	187,80
Stock	387	1484,00	1213,91	196,64	7561,47
Inversión	387	117,08	155,76	0,25	1254,34
Mantenimiento	387	42,09	25,24	1,38	150,98
Ligeros	387	2402,34	2154,25	540,60	14017,54
Pesados	387	392,36	283,87	105,05	1780,90
Autovía	387	44,45	17,14	12,78	92,29
PIBcap	387	21,66	4,20	14,67	35,48
Edad	387	41,94	3,37	35,09	50,59
Desempleo	387	19,50	8,15	3,03	42,31

Variable	N	Media	Dev. Est.	Mín	Máx
Gasolina	387	127,88	11,94	70,31	145,72
Precipitación	387	532,23	294,83	126,60	2176,00
Penal	387	0,22	0,42	0	1
SCP	387	0,44	0,50	0	1
Velocidad	387	0,11	0,32	0	1

Por otro lado, en la Figura 19 se muestra la evolución de los valores medios de las variables consideradas. En la figura no se han incluido las gráficas correspondientes a las variables ficticias (Penal, SCP y Velocidad) por tomar únicamente los valores 0 y 1 en los años de aplicación (ver Tabla 12).

La media provincial de accidentes muestra un descenso desde el año 2007 hasta el 2012, pasando su valor aproximado de 55 a 30. Por otro lado, a partir de 2012 y hasta 2015, sigue un proceso de crecimiento continuo hasta alcanzar una cifra cercana a los 35. Mientras tanto, la distancia media recorrida por motocicletas alcanzó su máximo de 25 millones de veh-km en 2010, estabilizándose a partir de entonces en valores próximos a los 18 millones de veh-km.

Por ello, la interpretación de las cifras de siniestralidad debe realizarse con extrema cautela, ya que están fuertemente vinculadas a la exposición al riesgo. En este sentido, al definir una tasa de riesgo como el número de accidentes por millón de veh-km, se puede observar una tendencia preocupante en términos de seguridad. Si bien hay un periodo de notable mejora de la seguridad desde 2007 hasta 2010, que se muestra reflejado por el descenso del número de accidentes por millón de veh-km de 2,4 a 1,4. A partir de 2010 comienza un proceso opuesto, viéndose incrementada la tasa de accidentes hasta alcanzar una cifra de 1,96 en 2015. Esta situación, como ya se ha comentado en la revisión bibliográfica, pone nuevamente en evidencia la necesidad de incluir la exposición al riesgo en los estudios de seguridad vial de V2RM.

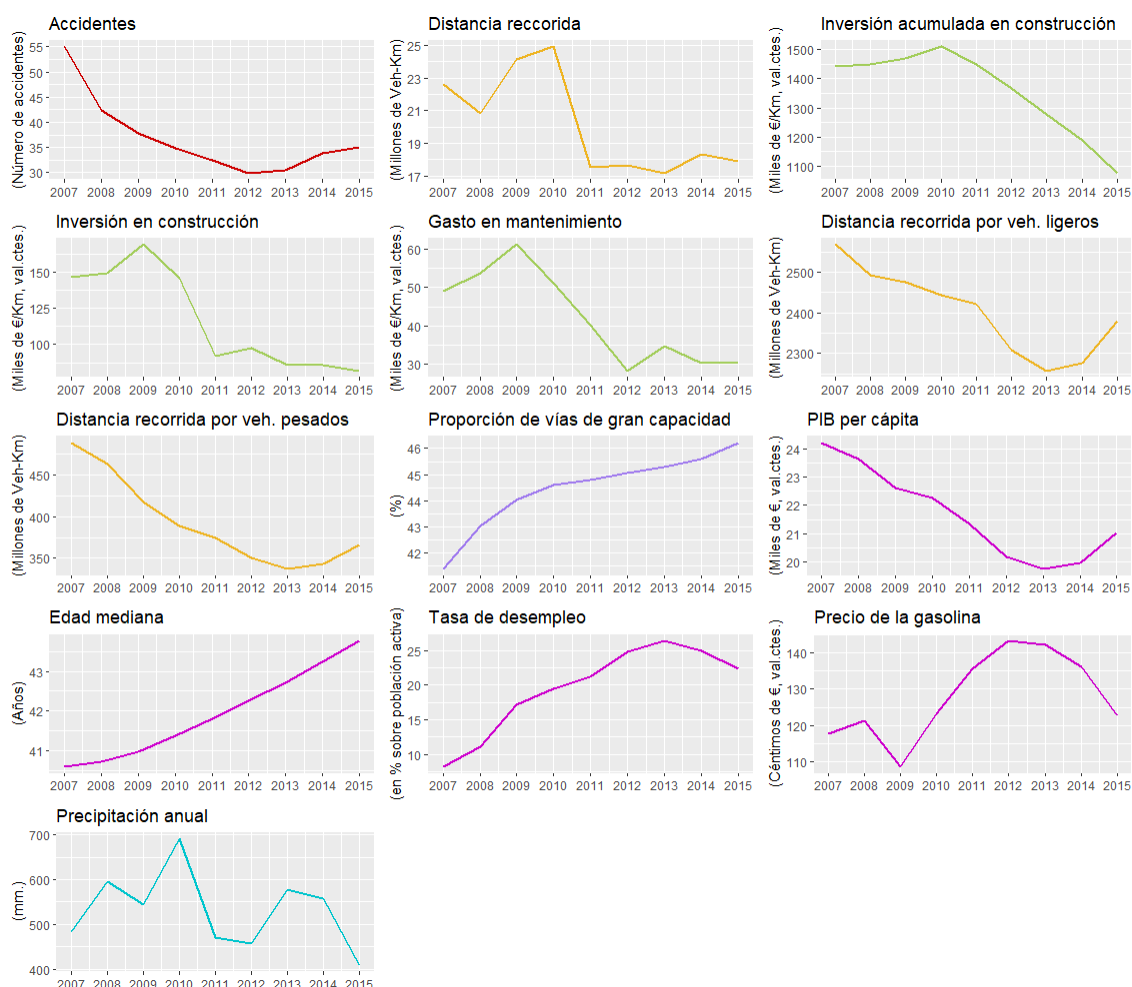


Figura 19. Evolución de los valores medios de las variables, 2007-2015. Fuente: elaboración propia.

Por su parte, las variables relativas a los recursos económicos destinados a carreteras muestran una evolución en sintonía con el contexto económico e inversor descrito en el apartado 4.2.3.1. En primer lugar, la inversión acumulada a diez años refleja un crecimiento constante hasta los 1,5 millones de euros por kilómetro en 2010. No obstante, como consecuencia de la crisis financiera, la menor dotación de recursos económicos a carreteras comienza a reflejarse en el constante descenso que se observa en la cifra de inversión acumulada, la cual disminuye hasta los 1,1 millones de euros por kilómetro en 2015. En esta línea, tanto la inversión en construcción como el gasto en mantenimiento, alcanzan su pico máximo en 2009, con unas cifras cercanas a los 169 mil euros por kilómetro destinados a construcción, y a los 61 mil de euros por kilómetro para el gasto en mantenimiento. Sin embargo, a partir de 2009 se observa un fuerte descenso en ambas variables. La inversión media en construcción cae hasta los 92 mil euros por kilómetro en 2011, y, a pesar de una leve recuperación en 2012, los valores continúan descendiendo hasta los 82 mil euros por kilómetro de media en 2015. Por su parte, el gasto en mantenimiento desciende hasta los 28 mil euros por kilómetro en 2012 y, tras una subida puntual en 2013, se estabiliza su dotación entorno a los 30 mil euros por kilómetro.

El inicio de la crisis financiera de 2008 se refleja nuevamente en la reducción del tráfico de vehículos ligeros y pesados en la RCE. Durante el periodo 2007-2013, el tráfico de vehículos ligeros y pesados se ve reducido en un 12,11% y 31,08%, respectivamente. Esta última cifra es especialmente representativa de la caída de la actividad económica del país. De hecho, tal y como se observa en la Figura 19, el PIB per cápita muestra una evolución paralela a la movilidad en la RCE. En los dos últimos años del periodo considerado, 2014-2015, ya comienza a observarse el aumento del volumen de tráfico y del PIB per cápita.

Respecto al aumento de la proporción de vías de gran capacidad, el mayor incremento se produce durante el periodo 2007-2010 (3,2%), mientras que el periodo 2011-2015 ya se ve afectado por el descenso de las inversiones en construcción de nuevas infraestructuras, lo cual se refleja en que la proporción de vías de gran capacidad aumenta en menor medida durante ese periodo, un 1,64%.

Continuando con otras variables socioeconómicas, la edad mediana muestra el envejecimiento de las provincias españolas. El valor medio crece de forma continuada desde los 40,58 años en 2007 hasta los 43,78 años en 2015. Por otro lado, la tasa de desempleo crece notablemente durante la mayor parte del periodo considerado, pasando del 8,17% en 2007 al máximo del 26,39 en 2013. En los próximos años se modera ligeramente la tasa hasta el 22,37%. Mientras tanto, el precio de la gasolina sigue una tendencia opuesta al volumen de tráfico y al PIB per cápita, especialmente desde 2009. De esta forma, el periodo de valores más altos en el precio de la gasolina (2012-2014) coincide con la época de menor movilidad y renta per cápita.

Por último, respecto a la precipitación media anual, los valores fluctúan sin tendencia aparente entre 409 mm de 2015 y los 692 mm de 2010.

4.2.3.3 Modelos de datos de recuento

El caso de estudio n.º 3 posee una estructura de datos diferente a la planteada en los dos casos previos realizados a nivel europeo. En el presente caso, la dimensión transversal de los datos N , compuesta por 43 provincias es notablemente superior a la dimensión temporal T , formada por los 9 años comprendidos entre 2007-2015. Para este tipo de relación entre las dimensiones N/T , Antoniou *et al.* (2016) recomiendan utilizar modelos de datos de recuento como enfoque analítico adecuado para datos de panel a nivel macro.

En esta línea, Anastasopoulos y Mannering (2009) destacaron que los modelos de regresión de Poisson y binomial negativo han sido los enfoques más comúnmente utilizados en la literatura de seguridad vial para analizar datos de recuento. De hecho, esta misma situación puede comprobarse en la revisión bibliográfica del capítulo dos. Las tres únicas referencias mostradas en la Tabla 1 que formulan un modelo de la frecuencia de siniestralidad para varios años (Abdul Manan *et al.*, 2013; Harnen *et al.*, 2003; Rolison *et al.*, 2013), plantean un modelo de regresión binomial negativa de parámetros fijos en sus análisis.

No obstante, según apuntaron Lord y Mannering (2010) y Mannering *et al.* (2016), numerosa literatura reciente ha avanzado en el tema de incorporar la heterogeneidad no observada en

los modelos de seguridad vial. Dentro de este enfoque más actual, los modelos de regresión binomial negativa con parámetros aleatorios (BNPA) han demostrado un mejor ajuste estadístico y una mayor precisión predictiva respecto a los modelos de regresión binomial negativa con parámetros fijos (BNPF). Estas mejoras se han comprobado principalmente en análisis en los que la variable dependiente está compuesta por todo tipo de vehículos de forma agregada (Anastasopoulos y Mannering, 2009; Caliendo *et al.*, 2019; Chen y Tarko, 2014; Coruh *et al.*, 2015; Hou *et al.*, 2021, 2018; Saeed *et al.*, 2019). Xin *et al.* (2017b) también han llegado a utilizar esta tipología de modelos para analizar la seguridad vial de los V2RM, concretamente a través de un modelo logit mixto. No obstante, no se ha encontrado un estudio de V2RM que analice la bondad del ajuste y la precisión predictiva para distintas especificaciones de modelos BNPA. Por lo tanto, en el caso de estudio n.º 3, se plantea en primer lugar un modelo BNPF, y se utiliza de referencia para comprobar el ajuste estadístico de los modelos BNPA formulados posteriormente. Así, la aplicación de estos últimos modelos también supone un aporte a la literatura, ya que, como se puede ver en la Tabla 3, no se han utilizado previamente en ninguno de los estudios que consideran la exposición al riesgo de los usuarios de V2RM.

4.2.3.4 Modelo de regresión binomial negativa con parámetros fijos (BNPF)

Para un amplio espectro de cuestiones relacionadas con el transporte (número de vehículos en una cola, fallos de fabricación, etc.), el modelo de Poisson es comúnmente utilizado debido a que la distribución de Poisson permite aproximar el recuento de eventos raros, como los accidentes de tráfico. No obstante, un requisito de la distribución de Poisson es que la media del proceso de recuento sea igual a la varianza. Este requisito generalmente no se cumple para datos relativos a la ocurrencia de accidentes. Por otro lado, la distribución binomial negativa relaja la asunción de igual media y varianza de la distribución de Poisson. De esta forma, el número esperado de accidentes para la observación i , λ_i , y la varianza se definen como:

$$E(y_i) = \lambda_i \quad (40)$$

$$Var(y_i) = E(y_i)[1 + \alpha E(y_i)] \quad (41)$$

Donde α es el llamado “parámetro de sobredispersión”, el cual representa la relación proporcional entre la varianza y la media. Cabe mencionar que cuando el parámetro de sobredispersión se iguala a cero, el modelo de regresión binomial negativa se reduce al modelo de Poisson. La definición presentada anteriormente es la forma más habitual utilizada en el modelo negativo binomial, la cual se puede encontrar en la literatura por el nombre de modelo NB2, en el que el número 2 indica el término exponencial y en la que la probabilidad de accidente para la observación i viene dada por (Hilbe, 2011):

$$P(y_i) = \frac{\Gamma(y_i + \frac{1}{\alpha})}{\Gamma(\frac{1}{\alpha})\Gamma(y_i + 1)} \left(\frac{\frac{1}{\alpha}}{\frac{1}{\alpha} + \lambda_i} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{\lambda_i}{\frac{1}{\alpha} + \lambda_i} \right)^{y_i} \quad (42)$$

Para este caso de estudio, también se ha comprobado la posibilidad de utilizar un modelo negativo binomial lineal, es decir, el NB1. No obstante, la aplicación del test de el Vuong de acuerdo al procedimiento indicado por Greene (2008), favorece la elección del modelo NB2. Por tanto, el modelo BNPF utilizado en el caso de estudio n.º 3 es el correspondiente al NB2. Además, en el presente caso se utilizará un enfoque de panel de datos con i provincias y t años similar al utilizado por Coruh *et al.* (2015), aunque añadiendo una variable de exposición al riesgo que dé cuenta de la cantidad de vehículos-kilómetro (motos) para cada provincia y año. Como señalaron Papadimitriou *et al.* (2013), de esta forma se pueden capturar las variaciones regionales y temporales de los accidentes. La medida de la exposición al riesgo se incorpora como variable *offset* (también llamada variable de exposición o multiplicador de tasa), al igual que se ha utilizado previamente en modelos BNPF tanto para V2RM (Abdul Manan *et al.*, 2013; Flask *et al.*, 2014; Harnen *et al.*, 2003; Rolison *et al.*, 2013) como para otros tipos de vehículos (Albalade y Bel-Piñana, 2019; Blaizot *et al.*, 2013). Aunque es de destacar que no se ha utilizado en modelos con parámetros aleatorios (BNPA). Así, el número esperado de accidentes de motos in el modelo BNPF es

$$\lambda_i = \exp(\beta X_i + \ln(Z_i) + \varepsilon_i) \quad (43)$$

en el que $X_i = X_{pt}$ son una serie de variables independientes por provincia p y año t , $Z_i = Z_{pt}$ son los valores de exposición específica de motos (distancia recorrida), β es el vector de coeficientes a estimar, ε_i es el término de error estocástico que da cuenta de la heterogeneidad en λ_i , y $\exp(\varepsilon_i)$ es el término de error con una distribución Gamma de media 1 y varianza α .

4.2.3.5 Modelos de regresión binomial negativa con parámetros aleatorios (BNPA)

Por otro lado, los modelos BNPA son una extensión de los BNPF que permiten diversas formas de incorporar la heterogeneidad no observada. El modelo general, en el que algunos parámetros son aleatorios y otros no, posee la siguiente estructura (Greene, 2016):

$$\beta_i = [\beta_1^t, \beta_{2i}^t]^t \quad (44)$$

$$x_i = [x_{1i}^t, x_{2i}^t]^t \quad (45)$$

Donde β_1 son los coeficientes de los K_1 parámetros no aleatorios, los cuales multiplican a las variables x_{1i} , mientras que los coeficientes de los K_2 parámetros aleatorios, que multiplican a las variables x_{2i} , y se definen como

$$\beta_{2i} = \beta_2 + \Gamma v_i \quad (46)$$

En los que β_2 son las medias fijas de las distribuciones para los K_2 parámetros aleatorios, v_i son los $K_2 \times 1$ términos de error latente no observable en la i -ésima observación de β_{2i} (los cuales siguen una distribución determinada) y Γ es una matriz (triangular inferior o diagonal) que produce la matriz de covarianza de los parámetros aleatorios, $\Omega = \Gamma \Gamma^t$. Respecto al término v_i , la distribución normal parece ser la que produce un mejor ajuste estadístico según

varios estudios, como los de Anastasopoulos y Mannering (2009), Chen y Tarko (2014) o Hou *et al.* (2018). No obstante, no se puede descartar que alguno de los parámetros aleatorios siga otra distribución, por lo durante la estimación de los modelos también se comprobarán otras distribuciones (por ejemplo: uniforme, triangular o lognormal). Finalmente, el número esperado de accidentes de motos y la función de log-verosimilitud se pueden expresar como:

$$\lambda|v_i = \exp(\beta_i^t X_i + \ln(Z_i) + \varepsilon_i)) \quad (47)$$

$$LL = \sum_i^n \log \int_{v_i} g(v_i) P(y_i|x_i, v_i) dv_i \quad (48)$$

En la que $g(v_i)$ es la función de densidad de probabilidad de v_i . No obstante, la estimación de este modelo por el método de máxima verosimilitud presenta una complejidad computacional considerable. Por ello, Greene (2016) desarrolló un procedimiento de simulación del método de máxima verosimilitud basado en secuencias aleatorias, cuya técnica de estimación implementada será la utilizada. Por otro lado, los estudios de Bhat (2003) y Train (2009) demostraron que las secuencias de Halton son muchas más efectivas que las secuencias aleatorias para los métodos numéricos utilizados en las simulaciones. Además, para este caso de estudio se han comprobado diferentes cantidades de secuencias de Halton a utilizar en las simulaciones, habiéndose verificado que con 600 se obtienen unos parámetros estimados estables y fiables, en línea con los resultados obtenidos por Hou *et al.* (2021).

Dada la naturaleza de los datos, se puede asumir la existencia de variaciones no observadas específicas por provincia. Por tanto, en el modelo BNPF se formulan 43 paneles específicos por provincia. Sin embargo, en este modelo de parámetros fijos en el que los efectos de las variables están restringidos a ser iguales a lo largo de todas las observaciones, la heterogeneidad no observada es ignorada en gran medida. Mannering *et al.* (2016) señalaron en este aspecto que ignorar la heterogeneidad no observada puede conducir a inferencias y predicciones erróneas derivadas de los parámetros estimados. Por tanto, para mitigar el impacto de este efecto adverso, en el modelo BNPA-1 se permite la variabilidad del término constante a lo largo de las observaciones y siguiendo una determinada distribución (por ejemplo, normal). Por otro lado, el modelo BNPA-2 también permite la variabilidad de otros parámetros distintos a la constante. En el caso del BNPA-2, todos los elementos fuera de la diagonal principal de la matriz de covarianza, Ω , están predefinidos como cero. Por su parte, en el modelo BNPA-3 se permite la correlación entre los parámetros aleatorios mediante la definición de la matriz Ω en su forma no restringida. De esta manera, se capturan las interacciones de la heterogeneidad no observada.

Como apuntaron Fountas *et al.* (2018a) y Saeed *et al.* (2019), dada la derivación de la matriz de varianza-covarianza Ω , se infiere que el cálculo de las desviaciones típicas de los parámetros aleatorios agrupados correlacionados se basa en los elementos de la diagonal principal, y fuera de ella, de la matriz Γ . Así, la desviación típica de cada parámetro aleatorio correlacionado se estima como:

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{y,y}^2 + \sigma_{y,y-1}^2 + \dots + \sigma_{y,1}^2} \quad (49)$$

donde σ_y es la desviación típica del parámetro aleatorio, y ; $\sigma_{y,y}$ es el correspondiente elemento de la diagonal principal de la matriz Γ ; y $\sigma_{y,y-1}^2 + \dots + \sigma_{y,1}^2$ hace referencia a los elementos de fuera de la diagonal principal, correspondientes a la matriz triangular inferior de un parámetro aleatorio particular, y . Siguiendo a Fountas *et al.* (2018a, 2018b), el error estándar y la puntuación z de cada parámetro aleatorio correlacionado se estiman en función de los coeficientes específicos generados por el software para la desviación típica de los parámetros aleatorios:

$$SE_{\sigma_y} = \frac{S_{\sigma_{yi}}}{\sqrt{N}} \quad (50)$$

$$z_{\sigma_y} = \frac{\sigma_y}{SE_{\sigma_y}} \quad (51)$$

En el que SE_{σ_y} es el error estándar de las desviaciones típicas; $S_{\sigma_{yi}}$ se corresponde con la desviación típica de la observación σ_{yi} ; N equivale al número de observaciones; y z_{σ_y} es la puntuación z correspondiente a la desviación típica (σ_y) del parámetro aleatorio y .

En la Tabla 14 se muestra, a modo de resumen, la especificación del tipo de parámetros empleados en los distintos modelos, donde K_1 y K_2 indican el número de parámetros fijos y aleatorios, respectivamente, y Γ el tipo de matriz utilizada para estimar la matriz de covarianzas de los parámetros aleatorios.

Tabla 14. Denominación de los modelos planteados y especificación de los parámetros aleatorios.

No.	Nombre del modelo	Acrónimo	Especificación de parámetros
1	Binomial negativo con parámetros fijos	BNPF	$K_1 = 15; K_2 = 0$
2	Binomial negativo con constante aleatoria	BNPA-1	$K_1 = 14; K_2 = 1; \Gamma: \{1\}$
3	Binomial negativo con parámetros aleatorios no correlacionados	BNPA-2	$K_1 = 12; K_2 = 3; \Gamma$: matriz diagonal
4	Binomial negativo con parámetros aleatorios correlacionados	BNPA-3	$K_1 = 12; K_2 = 3; \Gamma$: matriz triangular inferior

4.2.3.6 Modelo de siniestralidad de motocicletas en España

Finalmente, tanto para el modelo con parámetros fijos como para aquellos que cuentan con parámetros aleatorios, el modelo general de siniestralidad de motocicletas se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} Accidentes_{pt} = \exp(&\beta_0 + \beta_1 Stock_{pt} + \beta_2 Inversión_{pt} + \beta_3 Mantenimiento_{pt} \\ &+ \beta_4 Ligeros_{pt} + \beta_5 Pesados_{pt} + \beta_6 Autovía_{pt} + \beta_7 PIBcap_{pt} \\ &+ \beta_8 Edad_{pt} + \beta_9 Desempleo_{pt} + \beta_{10} Gasolina_{pt} + \beta_{11} Precipit_{pt} \\ &+ \beta_{12} Penal_{pt} + \beta_{13} SCP_{pt} + \beta_{14} Velocidad_{pt} \\ &+ \ln(Exposición_{pt}) + \varepsilon_{pt}) \end{aligned} \quad (52)$$

En el que el subíndice p indica la provincia y t el año.

4.2.3.7 Selección de modelo

Para la selección del modelo a analizar, entre todos los planteados en el caso de estudio n.º 3, se utilizan diversos criterios de selección y medidas de la bondad de ajuste. En primer lugar, como medidas de ajuste del modelo se calculan el criterio de información de Akaike (AIC) (Akaike, 1974). y el criterio de información bayesiano (BIC) o criterio de Schwarz (Schwarz, 1978):

$$AIC = -2LL(\beta) + 2K \quad (53)$$

$$BIC = -2LL(\beta) + K(\ln(n)) \quad (54)$$

Donde $LL(\beta)$ es la log-verosimilitud en la convergencia, K es el número de parámetros, y n es el número de observaciones. Ambos criterios consideran un término de penalización en función del número de parámetros estimables del modelo. Por otro lado, el ρ^2 o ρ^2 de McFadden también es ampliamente utilizado en la literatura como medida del ajuste general de un modelo:

$$\rho^2 \text{ de McFadden} = 1 - \frac{LL(\beta)}{LL(0)} \quad (55)$$

En el que $LL(0)$ es la log-verosimilitud del modelo con el término constante únicamente. No obstante, como señalan Washington *et al.* (2020), el estadístico ρ^2 posee el inconveniente de que, generalmente, aumenta conforme se incorporan nuevos parámetros al modelo, incluso cuando estos parámetros resultan estadísticamente no significativos. Una situación similar ocurre con el estadístico R^2 utilizado en regresiones lineales. Por ello, en el presente caso de estudio se utiliza el ρ^2 corregido según Long (1997), en el cual sí se considera el número de parámetros K estimados en el modelo:

$$\rho^2 \text{ corregido} = 1 - \frac{LL(\beta) - K}{LL(0)} \quad (56)$$

Por otro lado, para comparar dos modelos entre sí, se usa el test de la razón de verosimilitud:

$$\chi^2 = -2[LL(\beta_a) - LL(\beta_b)] \quad (57)$$

Donde $LL(\beta_a)$ es la log-verosimilitud del modelo a o modelo completo, $L(\beta_b)$ es la log-verosimilitud del modelo b o modelo reducido, y χ^2 está distribuida con grados de libertad igual a la diferencia del número de parámetros estimados en cada modelo. Por último, como medidas de precisión predictiva se usan la Desviación Media Absoluta (DMA) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RECM):

$$DMA = \frac{\sum_{i=1}^n |N_{obs,i} - N_{pred,i}|}{n} \quad (58)$$

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{obs,i} - N_{pred,i})^2}{n}} \quad (59)$$

Donde, n es el número total de observaciones utilizadas para la predicción, $N_{obs,i}$ es el número observado de accidentes de motos, y $N_{pred,i}$ es el número predicho.

CAPÍTULO 5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Capítulo 5:

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se exponen y discuten los resultados obtenidos en los tres casos de estudio. Para cada caso de estudio se ha aplicado un tipo de modelo econométrico adecuado a las características de los datos existentes, tal y como se ha desarrollado en el capítulo anterior. Por tanto, la exposición de los resultados de cada caso comienza con el análisis de los distintos modelos estimados de cara a seleccionar el mejor y posteriormente discutir los resultados obtenidos.

5.1 CASO DE ESTUDIO N.º 1: ANÁLISIS DE SINIESTRALIDAD VIAL A NIVEL EUROPEO

Para el caso de estudio n.º 1 se han desarrollado un total de seis modelos de regresión lineal con errores estándar corregidos por panel y una estructura autorregresiva AR(1) específica para cada país. Para la selección del mejor modelo se ha seguido una estrategia tipo *stepwise* o de regresión paso a paso. De esta forma, en un primer modelo se incluyen solamente las variables independientes objetivo del presente estudio (inversión en construcción y gasto en

Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

mantenimiento, tanto para el año actual como para un año de retardo), y en los modelos sucesivos se van añadiendo el resto de variables de control, pudiendo observarse así posibles cambios de signo o nivel de significancia de las variables. En la Tabla 15 se presentan los resultados de los seis modelos estimados. El software utilizado para estimar los modelos es STATA versión 12.1, aunque también se ha utilizado el paquete ‘panelAR’ de R como comprobación de resultados.

Tabla 15. Resultados de los modelos planteados en el caso de estudio n.º 1.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	PCSE- AR(1)	PCSE- AR(1)	PCSE- AR(1)	PCSE- AR(1)	PCSE- AR(1)	PCSE- AR(1)
Inversión	0,111 (0,078)	0,127 (0,092)	0,117 (0,084)	0,08 (0,084)	0,048 (0,076)	0,054 (0,063)
L1. Inversión	0,198*** (0,073)	0,194** (0,085)	0,19** (0,082)	0,168** (0,084)	0,139* (0,077)	0,156*** (0,06)
Mantenimiento	-0,139 (0,104)	-0,13 (0,114)	-0,138 (0,106)	-0,054 (0,112)	0,006 (0,11)	-0,036 (0,095)
L1. Mantenimiento	-0,228** (0,105)	-0,219* (0,115)	-0,209* (0,111)	-0,204* (0,119)	-0,196* (0,117)	-0,174* (0,095)
Precipitación		0,000 (0,006)				
D. Autovía			1,427 (4,772)	0,801 (4,737)	-0,676 (4,597)	
D. Motorización			0,009 (0,054)	-0,034 (0,058)	-0,030 (0,061)	
Desempleo				-1,89*** (0,58)	-2,256*** (0,492)	-1,768*** (0,522)
PIBcap				-0,985*** (0,214)	-1,355*** (0,158)	-1,238*** (0,175)
D. Alcohol					2,153* (1,216)	2,130* (1,155)
SCP					-13,469*** (3,178)	-12,04*** (3,369)
Constante	100,859*** (7,939)	97,845*** (9,267)	99,343*** (7,355)	142,173*** (11,595)	164,786*** (7,603)	156,462*** (9,071)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	PCSE- AR(1)	PCSE- AR(1)	PCSE- AR(1)	PCSE- AR(1)	PCSE- AR(1)	PCSE- AR(1)
Observaciones	360	360	360	360	360	360
R ²	0,575	0,66	0,624	0,713	0,820	0,724

Error estándar corregido entre paréntesis. “L1” significa que la variable se ha considerado con un año de retardo y “D” que la serie ha sido diferenciada.

*** $p < .01$, ** $p < .05$, * $p < .1$

Con respecto a los parámetros de autocorrelación específicos de cada país del modelo, por parsimonia, se indican los del modelo (6). Como se puede observar en la Figura 20, los valores de autocorrelación son relativamente altos en todos los países. En el capítulo 4 ya se resaltó que el método de errores estándar corregidos por panel (PCSE), propuesto por de Beck y Katz (1995), se basa en la estimación mediante MCO y la posterior corrección de la heterocedasticidad y correlación contemporánea. No obstante, no solventa la existencia de autocorrelación en las perturbaciones, como ocurre en el presente caso de estudio. Greene (2012) señala que, en esta situación, las estimaciones por MCO son ineficientes y la inferencia estadística se muestra gravemente afectada, mientras que los estimadores de MCG y MCGF pueden sortear este problema. Por tanto, la estimación empleada mediante regresión de Prais-Winsten, basado en MCG, y la aplicación de PCSE se muestra nuevamente justificada.

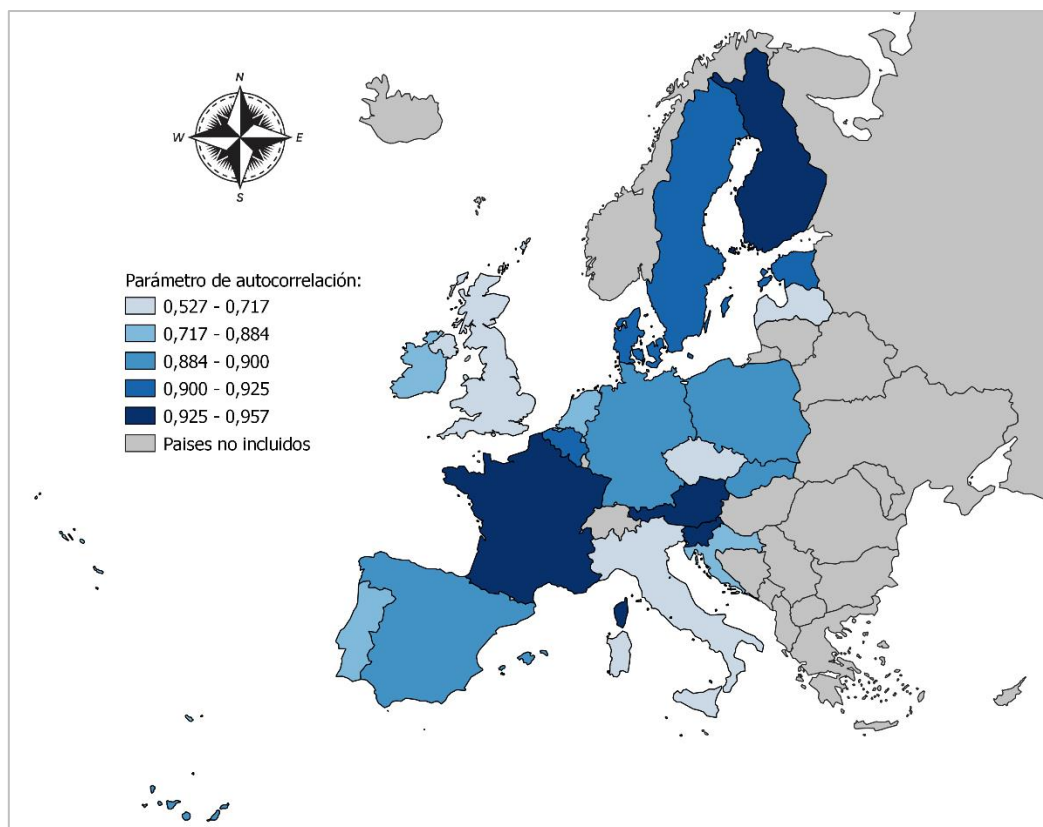


Figura 20. Parámetros de autocorrelación del modelo (6). Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, como se ha comentado anteriormente, en el **modelo (1)**, solo incluyen las variables correspondientes a los recursos económicos invertidos en carreteras, así como sus respectivos retardos de un año. Ambas variables obtienen resultados significativos solo para el caso con un año de retardo, y muestran distinto signo: positivo para la construcción y negativo para el mantenimiento. Los resultados de estas variables se mantienen muy parecidos a lo largo del resto de modelos.

Seguidamente, en el **modelo (2)** se añade la precipitación media anual, aunque ésta no muestra resultados significativos y es fuertemente rechazada. Su inclusión no provoca ningún cambio de signo en las variables anteriores, pero sí modifica ligeramente el nivel de significancia del gasto en mantenimiento con retardo. En ninguno de los modelos planteados en el estudio ha reflejado resultados significativos, por lo que es descartada.

Posteriormente, en el **modelo (3)** se incorporan la variación anual de la proporción de vías de gran capacidad y la variación anual de la tasa de motorización. Ambas variables se han considerado en forma de variación anual para garantizar la estacionariedad de las series temporales y, con ello, la aplicabilidad del método PCSE. El test de Breitung realizado a las variables sugiere que las series temporales de las mismas no son estacionarias. Gujarati (2003) señala que una forma de transformar las series temporales en estacionarias es diferenciándolas las veces necesarias. En este caso (y en el resto del presente trabajo) resulta suficiente con realizar la primera diferencia de las series, lo que equivale a considerar la

variación anual de las variables. Por otro lado, estas variables no resultan significativas en los modelos planteados en este caso de estudio.

A continuación, en el **modelo (4)** se añaden las variables de tasa de desempleo y el PIB per cápita. Estas variables no afectan al nivel de significancia de las variables incluidas en el modelo anterior, aunque la tasa de motorización cambia de signo. Por su parte, tanto la tasa de desempleo como la renta per cápita obtienen resultados significativos y con signo negativo.

Continuando con la inclusión de más variables, en el **modelo (5)** se incorporan la variación anual de consumo de alcohol per cápita y la introducción de un sistema de carnet por puntos, resultando ambas variables significativas y con signos opuestos: positivo para el consumo de alcohol y negativo para el SCP.

Por último, para verificar que las variables de proporción de vías de gran capacidad y tasa de motorización no están influyendo al resto de estimaciones, y también para obtener un modelo más parsimonioso, se eliminan estas variables en el **modelo (6)**. El descartar estas variables no ha condicionado el nivel de significancia del resto de variables incluidas en el modelo anterior, mientras que las estimaciones han mantenido unos valores muy similares y han mantenido el mismo signo. Además, los parámetros de autocorrelación específica para cada país muestran unos valores altos, oscilando entre los 0,527 de Letonia y los 0,957 de Francia. Por todo ello, podemos decir que la no inclusión de estas variables no supone un sesgo por variables omitidas. En definitiva, el modelo (6) mejora el ajuste estadístico del (4) y omite algunas variables estadísticamente no significativas del modelo (5). Por tanto, se considera que el modelo (6) es el mejor de los planteados en este caso de estudio y la discusión de resultados se realizará en base a éste. Así, el modelo estimado de accidentabilidad adquiere la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \widehat{Accidentes} = & 156,462 + 0,054 Inversión + 0,156 Inversión.L1 \\ & - 0,036 Mantenimiento - 0,174 Mantenimiento.L1 \\ & - 1,768 Desempleo - 1,238 PIBcap + 2,130 Alcohol.d \\ & - 120,040 SCP \end{aligned} \quad (60)$$

5.1.1 Discusión de resultados

- Inversión en construcción de carreteras

Comenzando con las principales variables objetivo del estudio, la inversión en construcción de carreteras muestra una relación directa con la tasa de accidentes, entrando en contradicción con lo formulado en la hipótesis H1. Este comportamiento de la inversión en construcción, con signo positivo, ya ha sido documentado en la literatura (Fridstrøm e Ingebrigtsen, 1991; Houston *et al.*, 1995; Sánchez-González *et al.*, 2021; Sánchez González *et al.*, 2020, 2018). Respecto a este tipo de resultado, Fridstrøm e Ingebrigtsen (1991) señalaron la posibilidad de que la inversión en construcción estuviera sobrerrepresentada por unas pocas actuaciones de alto coste (como túneles, puentes, o algunos tramos de carreteras montañosas). En una línea similar, Albalade *et al.* (2013) advirtieron de la posibilidad de

obtener conclusiones erróneas sobre la inversión en construcción si no se incluían variables de control de tipo legislativo, las cuales sí se han tenido en cuenta en el presente estudio, aunque de forma limitada, ya que solo se ha considerado la existencia o no de un sistema de carnet por puntos. Además, existe la posibilidad de producirse el denominado “efecto Peltzman” (Peltzman, 1975), por el cual los conductores tenderían a asumir un mayor riesgo en la conducción cuando perciben que mejoran los factores que afectan a la misma. Este efecto de compensación de riesgos puede producir un incremento de la siniestralidad en diversas situaciones relacionadas con la carretera, por ejemplo, cuando el conductor percibe un buen estado del pavimento (Chen *et al.*, 2017), o mediante la confianza que le aportan diversos dispositivos de seguridad pasivos del vehículo, como el airbag (Winston *et al.*, 2006) o el cinturón de seguridad (Lv *et al.*, 2015). Siguiendo esta hipótesis de compensación de riesgos, o de adaptación de comportamiento, Noland (2003) y Noland y Oh (2004) indicaron la posibilidad de que se produzca una migración de puntos negros o efectos más amplios en el conjunto del sistema viario, es decir, que la mejora en un lugar puede provocar un aumento del riesgo en otras partes de la red de carreteras. En el caso de carreteras de nueva construcción, de forma indirecta y como consecuencia de unas mejores calidades, se podrían producir algunos de estos efectos no deseados sobre la seguridad vial.

Sin embargo, tal y como señalaban Elvik *et al.* (2009), aunque un efecto de compensación de riesgos puede estar detrás de algún resultado inesperado provocado por medidas de mejora de la seguridad vial, rara vez se pueden documentar fehacientemente las evidencias que lo vinculan. En el caso de la inversión en construcción de carreteras, y desde un punto de vista teórico de ingeniería, la mejora de la seguridad vial es uno de los objetivos perseguidos. Por ello, el resultado mostrado en este caso de estudio parece contradecir dicho planteamiento. No obstante, la discusión de resultados continuará en el caso de estudio n.º 2, cuando se aporten nuevas evidencias que permitan profundizar en la relación existente entre inversión en construcción y seguridad vial.

■ Gasto en mantenimiento de carreteras

Por otro lado, el gasto en mantenimiento muestra una relación inversa con la tasa de accidentes, verificando lo enunciado por la hipótesis H2. Este resultado también se encuentra en línea con los hallados previamente en la literatura, y refleja el efecto beneficioso del gasto en mantenimiento sobre la seguridad vial reportado en estudios previos a nivel nacional (Albalade *et al.*, 2013; Fridstrøm e Ingebrigtsen, 1991; Nguyen-Hoang y Yeung, 2014; Sánchez-González *et al.*, 2021; Sánchez González *et al.*, 2020, 2018).

El gasto destinado al mantenimiento y conservación de carreteras tiene como objetivo la restitución, en la medida de lo posible, de la infraestructura a su estado inicial, de manera que pueda cumplir con la calidad y nivel de servicio establecidos. Desde el punto de vista de la seguridad vial, los recursos económicos pueden dedicarse a restablecer las condiciones diseñadas para un tráfico seguro, mejorar algunas carencias detectadas desde su puesta en servicio, o bien, para adaptar la infraestructura a nuevos criterios de seguridad. Naturalmente, el resultado esperado al ejecutar este tipo de actuaciones es el de un incremento de la seguridad. Numerosa literatura científica ha contrastado este efecto favorable en

intervenciones concretas, por ejemplo: Pardillo y Jurado (2009) establecieron que el mantenimiento de la resistencia al deslizamiento del pavimento por encima de cierto umbral¹⁸ implicaría una reducción del 68% en la tasa de accidentes en carreteras convencionales cuando dicho pavimento se encuentre mojado; Montella (2009) concluyó que la instalación conjunta de paneles direccionales, señalización de advertencia y balizamiento luminoso en curvas de radio reducido podía reducir en un 47,6% el número de accidentes en autovías; o también, Cafiso *et al.* (2017) demostraron que la sustitución de antiguas barreras de seguridad y pretiles por nuevos sistemas de contención de vehículos que cumplan la normativa europea EU1317¹⁹ se podría asociar a una reducción del 38% de heridos en autopistas. Por otro lado, la rehabilitación o reposición de firmes parece mostrar un impacto más heterogéneo en cuanto a la seguridad vial, y parece estar condicionada a distintos factores características de cada actuación, como el estado inicial del pavimento (Chen *et al.*, 2017) o la jerarquía de la carretera (Labi, 2011).

Por tanto, aparte de la necesidad de conocer y evaluar el impacto que producen ciertas medidas concretas de ingeniería sobre la siniestralidad, resulta igualmente imprescindible establecer el impacto que producen el conjunto de todas estas actuaciones sobre la seguridad vial. En este sentido, el presente estudio utiliza el gasto en mantenimiento y conservación de carreteras como una forma indirecta de aproximarse al conjunto global de modificaciones realizadas sobre el sistema viario. Así, los resultados mostrados en este caso de estudio permiten asociar un incremento unitario de 1.000€ por kilómetro de red a una reducción en la tasa de accidentes con heridos de -0,174 por mil millones de v-km.

Estos resultados sobre la influencia beneficiosa que el gasto en mantenimiento de carreteras tiene sobre los accidentes de tráfico y las víctimas asociadas a ellos deberán ser contrastado con las evidencias aportadas en los próximos casos de estudio.

▪ Precipitación anual

Continuando con la precipitación media anual, los resultados no han mostrado significancia estadística suficiente, por lo que se descartó la inclusión de dicha variable. Es de destacar que los efectos de la precipitación sobre la seguridad vial se han mostrado significativos en numerosos estudios existentes en la literatura, aunque la mayoría de éstos utilizan datos con agregación mensual o diaria (Theofilatos y Yannis, 2014a). Además, su efecto difiere según el nivel de agregación de los datos considerados: inverso cuando se utiliza la precipitación mensual, y directo cuando se utiliza la precipitación diaria (Eisenberg, 2004). Fridstrøm *et al.* (1995), en un estudio con varios países nórdicos, hallaron una relación directa entre las precipitaciones y en número de accidentes. Por su parte, Bergel-Hayat *et al.* (2013) hallaron resultados contradictorios entre países de Europa central (Francia y Países Bajos) y mediterráneos (Grecia). Al igual que en el artículo anterior, la incorporación de numerosos

¹⁸ Coeficiente de rozamiento transversal (CRT) > 60, obtenido con equipo de medida SCRIM.

¹⁹ UNE-EN 1317:2011. Sistemas de contención para carreteras.

Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

países con regiones climáticas muy diferenciadas puede ser la razón para que la precipitación no resulte significativa en el presente estudio.

- Proporción de vías de gran capacidad

Con respecto a las vías de gran capacidad, se espera que éstas aporten un efecto beneficioso en términos de seguridad vial, como consecuencia de unos mejores parámetros de diseño y mayores estándares de calidad (Elvik *et al.*, 2009). Albalate y Bel (2012), en un estudio realizado a nivel europeo, hallaron que la extensión de la red de vías de gran capacidad tenía un efecto beneficio en la disminución de la mortalidad, y que este efecto solo se daba si estas vías eran gratuitas. En caso contrario y, según dicho estudio, debido a un sistema de tarifario ineficiente, se produciría un redireccionamiento del tráfico que hacía que la siniestralidad aumentase en las carreteras alternativas, aumentando así la siniestralidad en el conjunto de la red. En este sentido, en el presente estudio se consideran países que optan por diferentes sistemas de financiación (vías de gran capacidad de peaje, gratuitas, o una mezcla de ambas), por lo que esta mezcla ha podido influir en la obtención de resultados no significativos.

- Tasa de motorización

Con respecto a la variación anual de la tasa de motorización, cabe mencionar que, según la literatura, dicha tasa ha mostrado distinto comportamiento según el nivel de desarrollo de un país: hasta un cierto nivel de desarrollo económico, la tasa de motorización se suele relacionar con aumentos en la siniestralidad vial (Page, 2001), mientras que, llegado a cierto punto, la tendencia se invierte y un aumento de la tasa de motorización se vincula con un efecto beneficio en términos de seguridad vial (Yannis *et al.*, 2011). En los ocho países de la UE analizados por Yannis *et al.* (2011), este cambio de tendencia se produce, de forma generalizada, para una tasa de motorización con un valor comprendido entre 150 y 300. En el presente estudio, el hecho de que, durante algunos años, países como Letonia, Croacia, Eslovaquia, Polonia y Estonia se encuentren dentro de esa primera franja, y, que la serie ha sido diferenciada para eliminar efectos de tendencia, puede haber influido en la obtención de resultados no significativos para esta variable.

- Tasa de desempleo y PIB per cápita

Por otro lado, la relación inversa hallada para las variables de desempleo y PIB per cápita era esperable, y, de hecho, se halla en sintonía con diversos estudios previos (Albalate *et al.*, 2013; Albalate y Bel, 2012; Aparicio Izquierdo *et al.*, 2013; Elvik, 2015; Hakim *et al.*, 1991; He, 2016; Sánchez-González *et al.*, 2021; Sánchez González *et al.*, 2020, 2018). Según Elvik (2015), la tasa de desempleo puede vincularse con una menor siniestralidad vial de tres maneras: reduciendo el tráfico (como consecuencia de una menor actividad económica), influyendo en el comportamiento de los usuarios (especialmente reduciendo el comportamiento alto riesgo como superar los límites de velocidad o conducir bajo los efectos del alcohol) o

influyendo en la composición del tráfico (principalmente afectando a una menor participación en el mismo de grupos de alto riesgo como jóvenes conductores). El primer efecto, puede descartarse en el presente caso de estudio, ya que se está controlando el nivel de exposición dentro de la variable dependiente. Respecto al segundo efecto, es difícilmente contrastable, ya que el comportamiento de los usuarios se escapa del alcance del estudio, no obstante, se ha considerado el consumo de alcohol como aproximación a este tipo de comportamiento de riesgo. Por último, el tercer efecto sí que puede estar produciéndose, ya que el grupo de mayor riesgo, los jóvenes, es a su vez el más afectado por periodos económicos adversos con elevadas tasas de paro, tal y como apuntan Dietrich y Möller (2016). Por otro lado, la relación inversa entre la renta per cápita y la siniestralidad obtenida en el modelo, se haya en sintonía con estudios previos a nivel macro, como los de Bishai *et al.* (2006) y Gaygisiz (2009) que han llegado a vincular unas condiciones económicas favorables con una mayor seguridad vial, especialmente relacionadas con una disminución de la mortalidad.

- Consumo de alcohol y Sistema de carnet por puntos

Respecto al consumo de alcohol, su relación directa con la siniestralidad en las carreteras está muy presente en la bibliografía consultada. Así pues, el 25 % de los accidentes mortales están relacionados con el consumo alcohol, y esto a pesar de que tan solo el 1,6% del total de kilómetros recorridos lo realizan conductores que superan una tasa de 0,5 g/l de alcohol en sangre, según la European Commission (2015). Esta relación perjudicial en términos de seguridad vial se ha visto en estudios realizados a nivel macro (Albalade, 2008; Albalade y Bel, 2012; Bishai *et al.*, 2006; Castillo-Manzano *et al.*, 2017; Page, 2001). Por otra parte, la introducción de algún tipo de sistema de carnet por puntos, ha dado como resultado el tener una influencia beneficiosa sobre la seguridad vial, tal y como se viene mostrando en la literatura que trata este tema (Abay, 2018; Albalade, 2008; Izquierdo *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2018; Zambon *et al.*, 2007). Estos efectos beneficiosos vienen derivados de un cambio en el comportamiento de los conductores, el cual conlleva un mayor cumplimiento de la normativa de circulación. Según Abay (2018), a medida que se acumulan puntos negativos (o, según el tipo de sistema, con la pérdida de puntos), se produce un mayor esfuerzo por parte de los conductores en circular de forma segura. Concretamente, y dependiendo del número de puntos negativos acumulados, el autor ha llegado a observar una reducción de entorno al 9-34 por ciento en las infracciones relacionadas con la velocidad, la cual repercute en una mejora de la seguridad vial.

5.2 CASO DE ESTUDIO N.º 2: ANÁLISIS DE LA MORTALIDAD VIAL A NIVEL EUROPEO, DIFERENCIANDO SEGÚN EL NIVEL DE INGRESOS DE CADA PAÍS

Para el caso de estudio n.º 2 se han desarrollado cuatro modelos de regresión lineal para cada grupo de países: Países de Rentas Altas (PRA) y Países de Rentas Bajas (PRB). Los tres primeros modelos son estimados según el método de Parks-Kmenta, basado en MCGF, con

Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

una estructura autorregresiva AR(1), y el cuarto modelo, que pretende garantizar la inferencia estadística, se estima mediante LSDV (equivalente a la regresión de efectos fijos) con una estructura de medias móviles MA(2), tal y como se describe en el capítulo cuatro.

Al igual que en el caso de estudio anterior, las variables independientes se han ido añadiendo siguiendo una regresión paso a paso, de modo que se puedan comprobar posibles cambios en los coeficientes del modelo y evitar, en la medida de lo posible, un sesgo por omisión de variables. Por otro lado, en este caso de estudio no se han retirado las variables sin significancia estadística suficiente del modelo seleccionado, aunque sí se ha comprobado que su eliminación no afecta de manera notable al resto de variables. De esta forma, se pretende facilitar la posterior comparación de resultados entre los modelos planteados para el grupo de PRA y PRB, ya que alguna variable resulta significativa en un grupo solamente.

5.2.1 Resultados del grupo de Países de Rentas Altas

Los resultados correspondientes a los modelos estimados para los PRA se encuentran en la Tabla 16. El software utilizado para estimar los modelos es STATA versión 12.1.

Tabla 16. Resultados de los modelos planteados en el caso de estudio n.º 2: Países de Rentas Altas.

Países de Rentas Altas				
	(1)	(2)	(3)	(4)
	MCGF-Parks- AR(1)	MCGF-Parks- AR(1)	MCGF-Parks- AR(1)	LSDV-Driscoll- Kraay-MA(2)
Inversión	0,006 (0,006)	0,005 (0,006)	0,010** (0,005)	0,019* (0,011)
L1. Inversión	0,008 (0,006)	0,027*** (0,006)	0,002 (0,005)	-0,005 (0,011)
Mantenimiento	-0,056*** (0,013)	-0,107*** (0,014)	-0,012 (0,012)	0,016 (0,027)
L1. Mantenimiento	-0,075*** (0,014)	-0,11*** (0,014)	-0,020* (0,010)	-0,053** (0,024)
D.Autovía		0,092 (0,203)	-0,316*** (0,102)	-0,447 (0,608)
D.Motorización		0,010*** (0,002)	0,003*** (0,001)	0,003 (0,002)
Desempleo		-0,250*** (0,023)	-0,121*** (0,015)	-0,115*** (0,023)

Países de Rentas Altas				
	(1)	(2)	(3)	(4)
	MCGF-Parks-AR(1)	MCGF-Parks-AR(1)	MCGF-Parks-AR(1)	LSDV-Driscoll-Kraay-MA(2)
D.PIBcap		0,008 (0,006)	-0,006 (0,004)	-0,001 (0,011)
D.Alcohol		0,159*** (0,021)	0,139*** (0,015)	0,170*** (0,048)
SCP		-1,048*** (0,097)	-0,804*** (0,075)	-1,012*** (0,189)
Precipitación		0,000 (0,000)	0,000 (0,000)	0,000 (0,000)
Constante	5,127*** (0,331)	7,549*** (0,301)		
Observaciones	216	216	216	216
R ²	-	-	-	0,963
Efectos Fijos (País)	NO	NO	SÍ	SÍ
Tendencia lineal (País)	NO	NO	SÍ	SÍ

Error estándar entre paréntesis. “L1” significa que la variable se ha considerado con un año de retardo y “D” que la serie ha sido diferenciada.

*** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$

En cuanto a los modelos obtenidos para los PRA, se puede observar que las variables significativas no cambian de signo con la incorporación de nuevas variables independientes o con la inclusión de efectos fijos por país y año. En el modelo (1), que incluye únicamente las variables objetivo, solamente resulta significativa la variable del gasto en mantenimiento (tanto en el año en el que se realiza el gasto, como durante el año posterior). Esta variable muestra una relación inversa con la variable dependiente, lo cual indica que el gasto en mantenimiento contribuye a disminuir el número de muertes en accidentes de carretera, tanto en el año en el que se realiza el gasto, como durante el año posterior.

Al incorporar el resto de variables independientes en el modelo (2), la inversión en construcción de carreteras con un año de retraso comienza a mostrar una relación significativa de signo positivo. Respecto al resto de variables, resultan significativas con signo positivo (relación directa con la mortalidad) la variación anual de la tasa de motorización y la variación anual del consumo de alcohol. La tasa de desempleo y la incorporación de un sistema de carnet por puntos resultan significativas con signo negativo (relación inversa con

Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

la mortalidad). El resto de variables independientes incorporadas en el modelo (variación de la proporción de vías de gran capacidad, variación de la renta per cápita, y precipitación) no resultan significativas.

Seguidamente, con el fin de identificar las características propias de cada país y para controlar la tendencia específica que cada país ha seguido durante el periodo de estudio, se incorporan en los modelos (3) y (4) los efectos fijos y la tendencia lineal por país. Además, en el modelo (4) se utiliza un modelo equivalente de efectos fijos con errores robustos tipo Driscoll-Kraay para garantizar la inferencia estadística y poder sacar conclusiones respecto a los valores de los coeficientes estimados, de los efectos fijos y de la tendencia por países. Los efectos fijos y la tendencia propia de cada país del modelo (4) serán los que se representen geográficamente junto con los relativos a los PRB, mientras que los valores numéricos de los efectos fijos y de tendencia correspondientes tanto del modelo (3) como del (4) pueden consultarse en el anexo.

Respecto al modelo (3), las principales diferencias con el modelo (2) son la aparición de una relación directa significativa para la variable de inversión en construcción, y la pérdida de significancia de la inversión con un año de retardo y del gasto en mantenimiento. Además, la variación anual de la proporción de vías de gran capacidad adquiere una relación significativa de signo negativo. Al utilizar errores robustos en el modelo (4), la proporción de vías de gran capacidad y la tasa de motorización, pierden significancia estadística. En el modelo (4) se puede apreciar el cambio de los errores estándar, evidenciando lo comentado en la literatura acerca de que el método de Parks tiende a producir unos errores estándares demasiado optimistas ante la presencia de correlación contemporánea (Beck y Katz, 1995; Hoechle, 2007). Como consecuencia, las variables de proporción de vías de gran capacidad y tasa de motorización pierden nivel de significancia en el modelo (4). Por otro lado, y aunque el signo de la relación no cambia, el nivel de significancia de las variables correspondientes a los recursos económicos invertidos en carreteras varía ligeramente, siendo ahora del 0,1 para la inversión en construcción y del 0,05 para el gasto en mantenimiento. El resto de variables se mantienen prácticamente igual. Por tanto, debido a que el modelo (4) es el que garantiza una adecuada inferencia estadística, es el que finalmente se selecciona. Así, el modelo estimado de mortalidad para PRA adquiere la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \widehat{Fallecidos}_{PRA} = & 0,019 \text{ Inversión} - 0,005 \text{ Inversión.L1} + 0,016 \text{ Mantenimiento} \quad (61) \\ & - 0,053 \text{ Mantenimiento.L1} - 0,447 \text{ Autovía.d} \\ & + 0,003 \text{ Motorización.d} - 0,115 \text{ Desempleo} - 0,001 \text{ PIBcap} \\ & + 0,170 \text{ Alcohol.d} - 1,012 \text{ SCP} + 0,000 \text{ Precipitación} + \hat{\alpha}_i \\ & + \hat{\tau}_i T, \end{aligned}$$

En los que los coeficientes $\hat{\alpha}_i$ e $\hat{\tau}_i$ relativos a los efectos fijos de cada país, i , y a la pendiente propia de la tendencia lineal, respectivamente, serán representados en el apartado de comparación de resultados.

5.2.2 Resultados del grupo de Países de Rentas Bajas

Los resultados correspondientes a los modelos estimados para los PRB se muestran en la Tabla 17. El software utilizado para estimar los modelos es STATA versión 12.1.

Tabla 17. Resultados de los modelos planteados en el caso de estudio n.º 2: Países de Rentas Bajas.

Países de Rentas Bajas				
	(1)	(2)	(3)	(4)
	MCGF-Parks-AR(1)	MCGF-Parks-AR(1)	MCGF-Parks-AR(1)	LSDV-DriscollKraay-MA(2)
Inversión	-0,003 (0,003)	-0,009** (0,004)	-0,011*** (0,002)	-0,017*** (0,004)
L1. Inversión	0,006** (0,002)	0,009** (0,004)	0,003 (0,002)	-0,007 (0,005)
Mantenimiento	-0,033*** (0,009)	-0,020** (0,008)	0,000 (0,006)	-0,002 (0,013)
L1. Mantenimiento	-0,029*** (0,01)	-0,048*** (0,008)	-0,02*** (0,006)	-0,022** (0,01)
D. Autovía		-0,567** (0,256)	-0,614*** (0,184)	-0,830** (0,349)
D. Motorización		0,001 (0,003)	-0,003 (0,003)	0,002 (0,005)
Desempleo		-0,025 (0,035)	-0,133*** (0,028)	-0,188** (0,066)
D. PIBcap		0,196** (0,095)	0,301*** (0,07)	0,473** (0,173)
D. Alcohol		0,189*** (0,07)	-0,053 (0,045)	-0,140 (0,082)
SCP		-0,809*** (0,246)	-0,228 (0,187)	-0,653 (1,163)
Precipitación		-0,003*** (0,000)	-0,001*** (0,000)	-0,001* (0,001)
Constante	9,794*** (0,719)	11,921*** (0,707)		

Países de Rentas Bajas				
	(1)	(2)	(3)	(4)
	MCGF-Parks-AR(1)	MCGF-Parks-AR(1)	MCGF-Parks-AR(1)	LSDV-DriscollKraay-MA(2)
Observaciones	198	198	198	198
R ²	-	-	-	0,946
Efectos Fijos (País)	NO	NO	SÍ	SÍ
Tendencia Lineal (País)	NO	NO	SÍ	SÍ

Notas: Error estándar entre paréntesis. “L1” significa que la variable se ha considerado con un año de retardo y “D” que la serie ha sido diferenciada.

**** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$*

Continuando con los modelos para el grupo de PRB (Tabla 17), en el modelo (1), la inversión en construcción resulta significativa y con signo positivo, solo durante el retardo de un año. Por otro lado, el gasto en mantenimiento muestra nuevamente resultados significativos de signo negativo, tanto en el año en curso como para el retarde de un año. Al incorporar el resto de variables independientes en el modelo (2), la inversión en construcción de carreteras comienza a mostrar un efecto reductor de la mortalidad durante el año de ejecución. De la misma forma, la variación anual de la proporción de vías de gran capacidad, la introducción de un sistema de carnet por puntos y la precipitación media anual también muestran este efecto. Por el contrario, las variaciones anuales del PIB per cápita y el consumo de alcohol reflejan un efecto directo en el aumento de la mortalidad.

Igual que para los PRA, en los modelos (3) y (4) se añaden los efectos fijos y tendencia lineal propia de cada país, cuyos valores se pueden consultar en el anexo. Respecto a las variables independientes, en el modelo (3) se observa que las variables de construcción (durante el año en curso) y mantenimiento (con un año de retraso) de carreteras muestran una relación inversa con la tasa de fallecidos. En cuanto al resto de variables significativas, la proporción de carreteras de gran capacidad y la tasa de desempleo muestran una relación inversa, y la renta per cápita una relación directa, mientras que el consumo de alcohol y el SCP pierden nivel de significancia. Por otro lado, en el modelo (4) se observa un aumento considerable de los errores estándares, como era esperable y ocurría en el caso de los PRA. Debido a esto, las variables que obtuvieron resultados significativos en el modelo (3) bajan nivel de significancia —excepto la inversión en construcción, que se mantiene al 0,01—, aunque todas ellas obtienen resultados significativos.

Finalmente, el modelo estimado de mortalidad para PRB adquiere la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \widehat{Fallecidos}_{PRB} = & -0,017 \text{ Inversión} - 0,007 \text{ Inversión.L1} \\ & - 0,002 \text{ Mantenimiento} - 0,022 \text{ Mantenimiento.L1} \\ & - 0,830 \text{ Autovía.d} + 0,002 \text{ Motorización.d} - 0,188 \text{ Desempleo} \\ & + 0,473 \text{ PIBcap.d} - 0,140 \text{ Alcohol.d} - 0,653 \text{ SCP} \\ & - 0,001 \text{ Precipitación} + \hat{\alpha}_i + \hat{\tau}_i T, \end{aligned} \quad (62)$$

En el que los coeficientes $\hat{\alpha}_i$ e $\hat{\tau}_i$ relativos a los efectos fijos de cada país, i , y a la pendiente propia de la tendencia lineal, respectivamente, serán representados en el siguiente apartado.

5.2.3 Discusión de resultados

Como se comentó previamente, el modelo (4) es el que proporciona una mejor inferencia estadística, por lo que será el que se utilice para comparar los resultados para ambos grupos de países. En la Tabla 18 se muestran los resultados correspondientes a ambos grupos. Así pues, comparando estos resultados, se pueden apreciar las diferencias en los efectos provocados por las variables consideradas. Estas diferencias son especialmente remarcables en la influencia que ejercen las inversiones en construcción y el gasto en mantenimiento sobre la tasa de mortalidad.

Tabla 18. Comparación de modelos estimados para países de rentas altas y bajas.

	Países de Rentas Altas	Países de Rentas Bajas
Inversión en construcción	0,019* (0,011)	-0,017*** (0,004)
Inversión en construcción (un año de retardo)	-0,005 (0,011)	-0,007 (0,005)
Gasto en mantenimiento	0,016 (0,027)	-0,002 (0,013)
Gasto en mantenimiento (un año de retardo)	-0,053** (0,024)	-0,022** (0,010)
Proporción de vías de gran capacidad (variación anual)	-0,447 (0,608)	-0,83** (0,349)
Tasa de motorización (variación anual)	0,003 (0,002)	0,002 (0,005)
Tasa de desempleo	-0,115*** (0,023)	-0,188** (0,066)
PIB per cápita (variación anual)	-0,001	0,473**

	Países de Rentas Altas	Países de Rentas Bajas
	(0,011)	(0,173)
Consumo de alcohol (variación anual)	0,170***	-0,140
	(0,048)	(0,082)
Sistema de carnet por puntos	-1,012***	-0,653
	(0,189)	(1,163)
Precipitación media anual	0,000	-0,001*
	(0,000)	(0,001)

Error estándar entre paréntesis. *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$

▪ Inversión en construcción de carreteras

La inversión en construcción de carreteras durante el año en curso muestra una relación inversa con la tasa de mortalidad en los PRB, mientras que muestra una relación directa (aunque mucho menos significativa) en los PRA. Esta relación directa entre la inversión en construcción de carreteras y la mortalidad encontrada en el caso de los PRA, ya se vio reflejada en el caso de estudio n.º 1 del presente trabajo, y en otros estudios anteriores (Fridstrøm e Ingebrigtsen, 1991; Sánchez González *et al.*, 2020, 2018). Sin embargo, al considerar una agrupación de países en función de su desarrollo económico, se ha podido observar una relación inversa entre la inversión en construcción y la tasa de mortalidad en los PRB, lo cual vendría a confirmar la hipótesis H3. De forma similar y en el contexto de un país con baja renta per cápita, este efecto de las inversiones en construcción también ha sido observado en un estudio realizado en China (Sun *et al.*, 2019). También, en el caso de España, Sánchez González *et al.* (2020) hallaron esta relación inversa para las provincias con menor renta per cápita.

El cambio de signo en la influencia provocada por la inversión en construcción de carreteras entre PRB y PRA plantea la posibilidad de que las inversiones en construcción posean unos rendimientos decrecientes en cuanto a beneficios sobre la seguridad vial, según el nivel de desarrollo. En líneas más generales, la inversión en construcción de nuevas infraestructuras posee un efecto multiplicador sobre el desarrollo de un país (Foster *et al.*, 2023), el crecimiento económico (Adame García *et al.*, 2017) o el bienestar ciudadano (Ganelli y Tervala, 2016) que ha sido ampliamente investigado y acreditado durante las últimas décadas. Rodrigue (2020) resalta la importancia del contexto de la red viaria, destacando que el mayor efecto multiplicador se da cuando la infraestructura existente es limitada o se encuentra en un proceso de expansión, y que éste se va reduciendo a medida que el sistema se desarrolla. Trasladando este punto de vista al efecto esperado por las inversiones en carreteras sobre la seguridad vial (Figura 21) se podría intuir que los mayores beneficios se van a producir en contextos en los que el sistema viario es reducido o todavía se encuentra en proceso de expansión. Por otro lado, una vez se alcanza cierta capacidad, conectividad y fiabilidad en el

sistema viario, los beneficios obtenidos por nuevas inversiones en construcción adicionales van a ser más limitados.

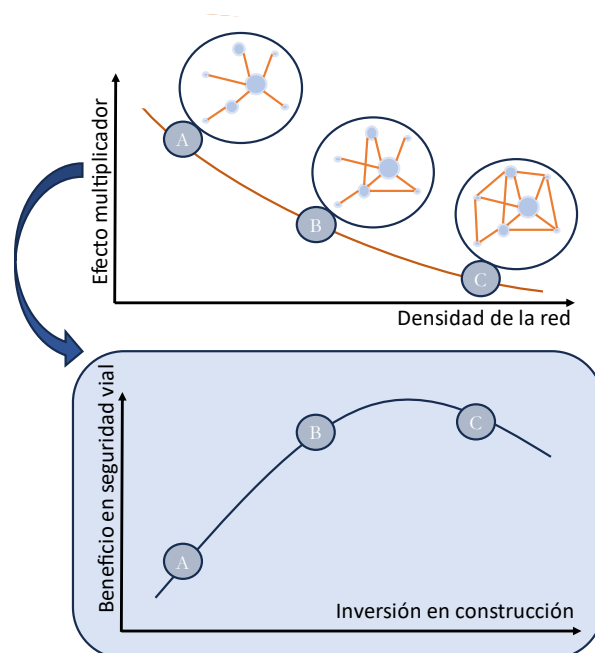


Figura 21 - Esquema general del efecto multiplicador decreciente de las inversiones en infraestructuras y posible vínculo con beneficios en seguridad vial de la inversión en construcción.

Fuente: elaboración propia, inspirado en Rodrigue (2020) y Kuznets (1955).

De esta forma, además de las mejoras en términos de accesibilidad y cohesión territorial que las inversiones en carreteras aportan a los PRB, en el presente estudio se demuestra que también contribuyen a la reducción de la tasa de mortalidad. Este efecto beneficioso sobre la seguridad vial puede deberse a la gran mejora que constituye la construcción de nuevas vías de gran capacidad y el desdoblamiento de carreteras de dos carriles (hay que tener en cuenta que la tasa de mortalidad en las carreteras de gran capacidad es mucho menor que en las carreteras de dos carriles (Elvik y Vaa, 2009; European Commission, 2017) que se ha llevado a cabo en estos países gracias en gran medida a los Fondos de Cohesión Europeos.

- Gasto en mantenimiento de carreteras

Respecto al gasto en mantenimiento, los resultados para PRA y PRB muestran coincidencia en cuanto al efecto reductor (mayor en los PRA que en los PRB) de esta variable sobre la tasa de mortalidad durante el año posterior al de ejecución del gasto, así como en cuanto al nivel de significancia de la variable, lo que corrobora las hipótesis H2. Este hallazgo se halla en línea con los encontrados en estudios a nivel nacional (Albalade *et al.*, 2013; Fridstrøm e Ingebrigtsen, 1991; Nguyen-Hoang y Yeung, 2014; Sánchez González *et al.*, 2018).

Estos resultados ponen de manifiesto que un adecuado gasto en mantenimiento de carreteras no solo evita un coste en reparación o renovación de 3 a 6 veces mayor a medio o largo plazo (European Commission, 2018), sino que también puede contribuir a la reducción de víctimas

mortales a corto plazo. En los sistemas viarios consolidados desde hace tiempo, un problema recurrente es la mejora y mantenimiento de los mismos, ya que el capital económico requerido es proporcional al grado de desarrollo de la red. Por ello, volviendo al planteamiento del punto anterior sobre los efectos decrecientes de la inversión en construcción, parece razonable pensar que los mayores beneficios en cuanto a seguridad vial en los PRA se produzcan mediante el aumento de recursos económicos al mantenimiento y conservación de carreteras. De hecho, el efecto beneficioso mostrado por esta variable es más del doble en los PRA (-0,053) que en los PRB (-0,022).

- Proporción de vías de gran capacidad

Respecto a la variación anual de la proporción de vías de gran capacidad, los resultados muestran una influencia significativa y de signo negativo en los PRB, mientras que para los PRA la influencia es menor y no estadísticamente significativa. Así pues, la extensión de los 11,856 km de vías de gran capacidad realizada en los PRB durante el periodo 2000-2016 parece haber propiciado mejoras en las tasas de mortalidad de dichos países, en línea con los resultados de estudios anteriores a nivel europeo (Albalade, 2008; Castillo-Manzano *et al.*, 2015, 2014). En cuanto a los PRA, a pesar de aumentar su red de gran capacidad en 7.437 km durante el mismo periodo, los resultados de reducción de la mortalidad no parecen mostrarse de forma tan inmediata.

- Tasa de motorización

La variación anual de la tasa de motorización no ha mostrado resultados significativos en ningún grupo de países. Respecto a esta variable, existen estudios donde se ha demostrado que el aumento de la tasa de motorización conlleva un aumento de los índices de siniestralidad, como el de Page (2001). Por su parte, Ali *et al.* (2019) hallaron que un incremento del 1% en la tasa de motorización está vinculado con aumentos en las cifras de fallecidos en una selección de países de ingresos altos de Asia y América (0,617% y 1,705%, respectivamente), pero no obtuvieron resultados concluyentes para los países de ingresos altos europeos. Por otro lado, Yannis *et al.* (2011) también demostraron que al llegar a un cierto umbral, la tendencia se invierte y la tasa de motorización pasa a vincularse con reducciones en la mortalidad. De acuerdo con Kopits y Cropper (2005), esta situación se da en países con mayor desarrollo económico y en los que se invierte más en seguridad vial, tanto a nivel individual como gubernamental. Sin embargo, en el presente estudio, al considerar la variación anual de la tasa de motorización, ninguno de los efectos mostrados anteriormente ha sido reflejado en el corto plazo que representa la variable.

- Tasa de desempleo

La tasa de desempleo sí arroja resultados significativos y con diferencias considerables entre PRA y PRB. Concretamente, la influencia del desempleo en la reducción de la mortalidad es

un 60% mayor para los PRB. Como posible explicación de este fenómeno, Elvik (2015) señalaba que la población con mayor riesgo de sufrir un accidente mortal—como son los jóvenes—se ve especialmente afectada por el aumento del desempleo, lo que a su vez hace disminuir el uso del vehículo privado por esta parte de la población. Además, esta situación se acentúa en el caso de los PRB. En esta línea, Dietrich y Möller (2016) hallaron que la población joven es la más afectada durante periodos económicos adversos, como ocurre a partir de 2008 durante el periodo estudio.

- PIB per cápita

Para el caso de la variación anual de la renta per cápita, solo se han obtenido resultados significativos (de signo positivo) para los PRB. Como explicación a este resultado, se puede tener en cuenta lo indicado por Yannis *et al.* (2014) respecto a la dinámica macroeconómica: a corto plazo, cabe esperar que un aumento de la renta per cápita influya de manera directa en el aumento de la mortalidad; mientras que, a largo plazo, dicho aumento supone un factor reductor de la misma. Sin embargo, este efecto beneficioso no se está manifestando para los PRA. No obstante, el efecto beneficioso a medio o largo plazo de una mayor renta per cápita puede estar reflejándose en los PRA a través de los menores coeficientes de efectos fijos que este grupo de países tiene, como se verá más adelante.

- Consumo de alcohol

En cuanto a la variación anual de consumo de alcohol per cápita, solo resulta significativa en los PRA. Respecto a que no se hayan obtenido resultados significativos en los PRB, la especial coyuntura de algunos países del grupo ha podido influir notablemente. Así pues, resulta especialmente destacable que países como Estonia y Lituania hayan experimentado el mayor aumento en el consumo per cápita de alcohol entre 1998 y 2016—de 8 y 6.3 a 15.4 y 13.6 litros, respectivamente—mientras que son de los países que han mostrado una mayor tendencia anual decreciente en sus cifras de fallecidos (ver anexo). Además, existe una tradición especialmente restrictiva en cuanto a la tasa de alcoholemia permitida en los países del este, lo que se muestra en que seis de los PRB contemplan una tasa máxima permitida de 0,0 g/l para conductores noveles y comerciales, mientras que en el grupo de PRA solo Alemania fija estos niveles (European Commission. Directorate General for Transport, 2015). Por último, se han llegado a detectar diferencias considerables entre países PRA y PRB respecto al porcentaje de accidentes con heridos graves en los que la tasas alcohol en sangre superaba los 0,1g/l, con un rango comprendido entre el 17,7% de Lituania y el 42,5% de Bélgica (Legrand *et al.*, 2013).

- Sistema de carnet por puntos

De forma similar, la variable SCP ha resultado significativa, y de signo negativo únicamente en los PRA. Relacionado con este resultado, existen diversos estudios que demuestran la

efectividad del DPS en países pertenecientes al grupo PRB, como los de De Paola *et al.* (2013), Izquierdo *et al.* (2011) o Zambon *et al.* (2007). Sin embargo, también se ha demostrado que el efecto disuasorio de estas medidas es limitado en el tiempo (Abay, 2018; Castillo-Manzano y Castro-Nuño, 2012). En este sentido, Castillo-Manzano y Castro-Nuño (2012) cuantificaron que el impacto inicial de reducción de la mortalidad (de entre 15-20%), desaparece en menos de 18 meses. Como consecuencia de esta escasa perduración en el tiempo, la tendencia específica de cada país (controlada en el presente estudio), ha podido absorber la influencia de esta variable sobre la tasa de mortalidad de los PRB, puesto que dicha tendencia muestra una mayor pendiente que en el caso de los PRA (como se verá más adelante). De todas formas, la implantación de algún sistema de carnet por puntos se ha mostrado reductora de la mortalidad en los PRA.

- Precipitación anual (Precipitación)

En el caso de la precipitación media anual, se comprueba un efecto inverso respecto a la tasa de fallecidos solamente en los LIC y con una significancia estadística baja. Aunque este efecto de signo negativo ha sido previamente reflejado en la literatura, Bergel-Hayat *et al.* (2013) apuntan que los mecanismos por los que puede influir con distinto signo a diversos países no han sido identificados.

- Efectos fijos y tendencia propia por país

Los coeficientes de los efectos fijos estimados para cada país, $\hat{\alpha}_i$, se muestran en la Figura 22. Estos valores pretenden reflejar las características propias y diferenciales de cada país, las cuales no han sido recogidas en los modelos a través las variables explicativas. En la Figura 22 se puede apreciar claramente cómo los países del grupo de PRA poseen unas características propias que les vinculan a unos coeficientes de efectos fijos menores que los correspondientes a los PRB y, por ello, con unas menores tasas de mortalidad. Estos mejores condicionantes nacionales pueden deberse a diversos factores no considerados explícitamente en el presente estudio, como, por ejemplo: una mejor atención sanitaria, una mayor cultura de seguridad vial de la población o mayor calidad de la infraestructura viaria y de los vehículos. Por otro lado, también se observa que, dentro de los PRB, los países más periféricos (países del Este y Portugal) son los que cuentan con los valores más elevados, y por ello con las características más negativas no consideradas en el modelo genérico respecto al problema de estudio.

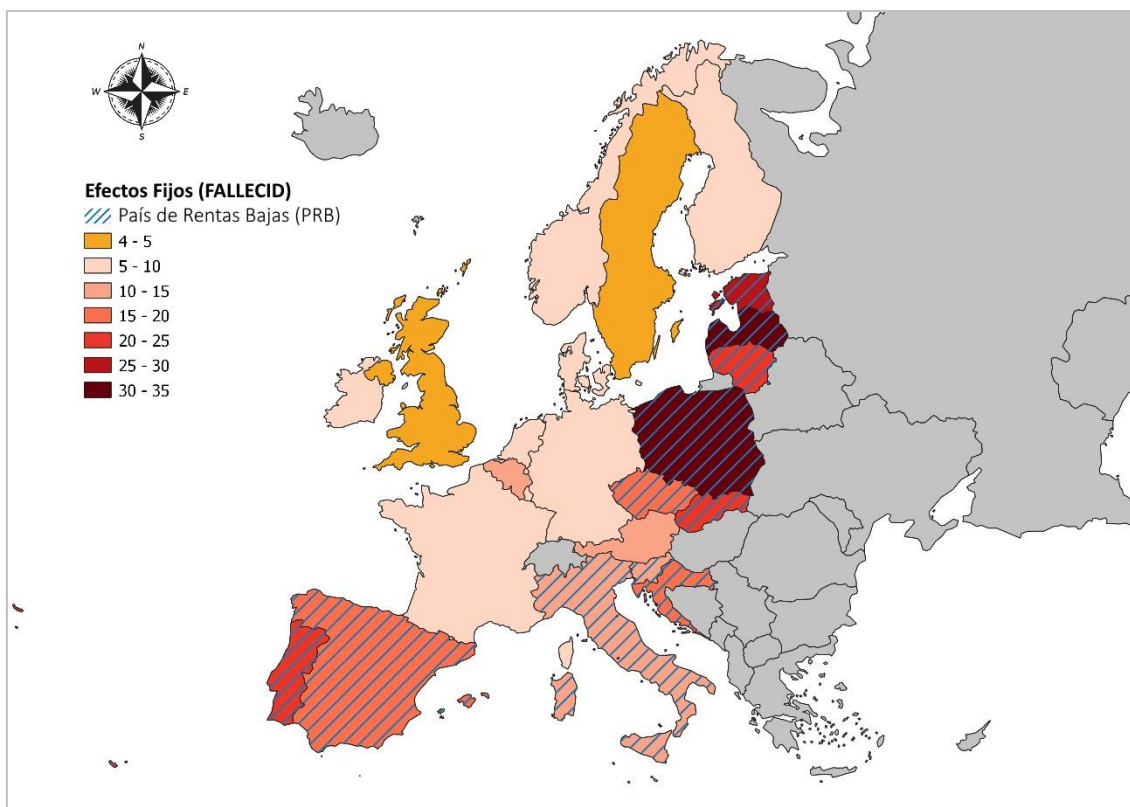


Figura 22. Efectos fijos propios de cada país. Fuente: elaboración propia.

No obstante, las diferencias observadas en la Figura 22 parecen haber propiciado un mayor margen de mejora para los PRB.

Como consecuencia, los PRB muestran, de forma general, una tendencia mucho más fuerte a disminuir sus cifras de fallecimientos que los PRA. Esta situación puede comprobarse a través de los coeficientes estimados para la pendiente de la tendencia lineal característica de cada país ($\hat{\tau}_i$), la cual se representa en la Figura 23. Nuevamente, la mayor tendencia reductora en la tasa de mortalidad se observa en los países más periféricos del grupo PRB.

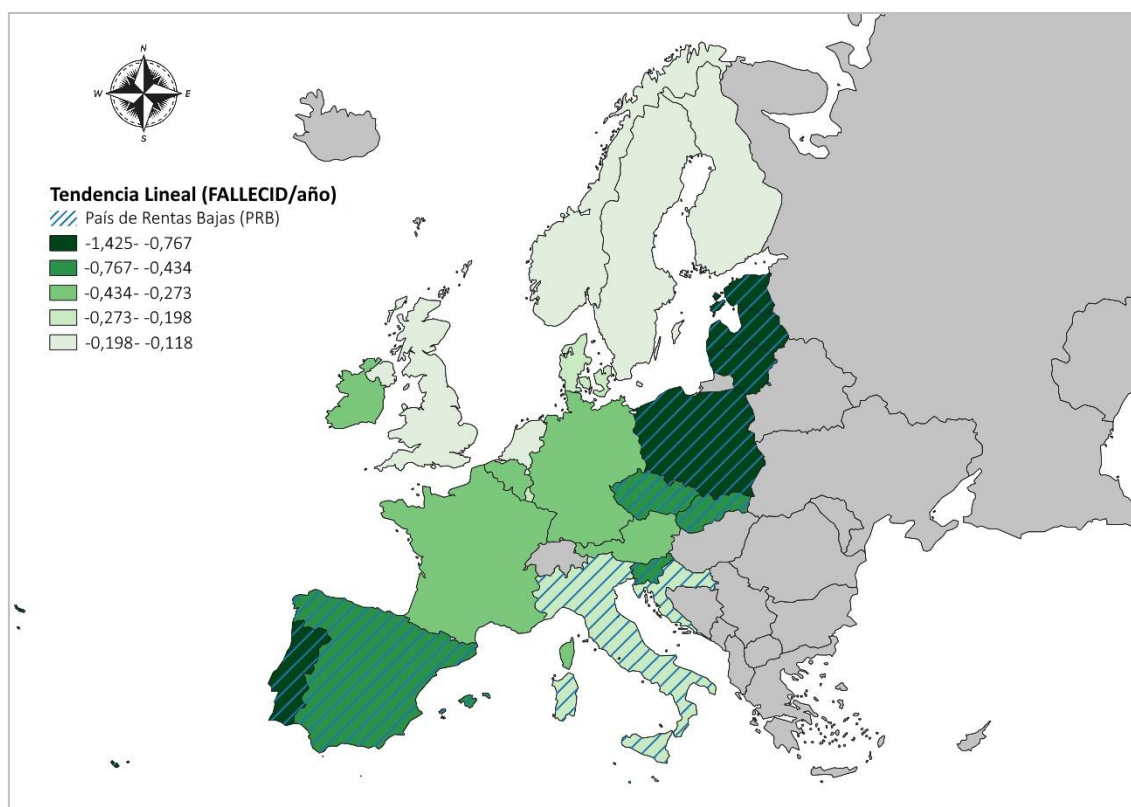


Figura 23. Tendencia lineal específica de cada país. Fuente: elaboración propia.

5.3 CASO DE ESTUDIO N.º 3: ANÁLISIS DE SINIESTRALIDAD VIAL DE MOTOCICLETAS EN ESPAÑA

Para el caso de estudio n.º 3 se han desarrollado cinco modelos de regresión binomial negativa con distintas especificaciones de los parámetros que los componen. Los cuatro primeros modelos se corresponden con los planteados en la Tabla 14 del capítulo de metodología. A partir de los resultados obtenidos para estos modelos, se selecciona el mejor especificado y se formula nuevamente un quinto modelo con la misma estructura de este, pero incluyendo las variables estadísticamente significativas solamente. El software utilizado para la estimación de los modelos es LIMDEP versión 11, mientras que STATA versión 12.1 se ha utilizado para verificar los resultados de los modelos con parámetros fijos.

Los resultados de los primeros cuatro modelos se muestran en la Tabla 19. Se observa que once de las catorce variables independientes obtienen resultados significativos en todos los modelos (salvo el gasto en mantenimiento y el precio de la gasolina en el modelo (1), y la proporción de vías de gran capacidad en el modelo (4). Los resultados también muestran consistencia en cuanto al signo de la relación en los diferentes modelos analizados.

El parámetro de dispersión (α) de la distribución binomial negativa también muestra resultados estadísticamente significativos en los cuatro modelos, lo cual confirma la sobredispersión y justifica su uso frente a la distribución de Poisson.

Respecto al ajuste de los modelos, el (2) aporta mejores resultados respecto al (1) en todos los criterios de selección planteados. El modelo (2) incrementa el ρ^2 corregido en un 2,53%, y obtiene unos valores más bajos en los criterios AIC y BIC. Además, también mejora la precisión predictiva en un 18,18% para la DMA y en un 8,99% para la RECM, mientras que el test de razón de verosimilitud muestra predilección por el modelo (2). Cabe mencionar que este modelo (2) es equivalente al modelo estándar de efectos aleatorio es en el que dichos efectos se encuentran normalmente distribuidos, como apuntan Anastasopoulos y Mannering (2009) y Hilbe (2011). Por ello, también se ha comparado el modelo (2) con su versión equivalente al modelo de efectos aleatorios con distribución beta, aunque no se obtuvo un mejor ajuste en ese caso y, por tanto, no se ha incluido en la comparación de modelos.

Tabla 19. Resultados de modelos planteados para el caso de estudio n.º 3: selección de especificación de parámetros fijos o aleatorios.

	(1)	(2)	(3)	(4)
	BNPF	BNPA-1	BNPA-2	BNPA-3
Stock (<i>en miles de € por km, ctes. 2015</i>)	0,00011** (2,15)	0,00013*** (3,11)	0,00013*** (3,00)	0,00018*** (4,89)
Inversión (<i>en miles de € por km, ctes. 2015</i>)	-0,00070*** (-3,18)	-0,00073*** (-3,02)	-0,00073*** (-3,05)	-0,00075*** (-3,62)
Mantenimiento (<i>en miles de € por km, ctes. 2015</i>)	-0,00115 (-0,49)	-0,00270* (-1,87)	-0,00271* (-1,90)	-0,00251* (-1,89)
Ligeros (<i>en millones de veh-km</i>)	0,00009** (1,98)	0,00008*** (2,88)	0,00008*** (2,84)	0,00009*** (3,54)
Pesados (<i>en millones de veh-km</i>)	-0,00043 (-1,56)	-0,00070*** (-4,37)	-0,00073*** (-4,44)	-0,00068*** (-4,27)
Autovia (<i>en %</i>)	-0,00790** (-2,25)	-0,00450* (-1,89)	-0,00425* (-1,80)	-0,00217 (-0,96)
PIBcap (<i>en miles de €, ctes. 2015</i>)	-0,05585*** (-3,22)	-0,04458*** (-4,45)	-0,03906*** (-3,88)	-0,02370** (-2,38)
Des. Típ de la función de densidad	—	—	0,00816*** (7,47)	0,09135*** (18,47)
Edad (<i>en años</i>)	-0,03443** (-2,22)	-0,04768*** (-5,28)	-0,04510*** (-5,03)	-0,06433*** (-7,43)
Desempleo (<i>en %</i>)	-0,03506*** (-5,44)	-0,04030*** (-7,39)	-0,03979*** (-7,29)	-0,03225*** (-5,84)

	(1)	(2)	(3)	(4)
	BNPF	BNPA-1	BNPA-2	BNPA-3
Gasolina (<i>en céntimos de € por litro</i>)	0,00302 (0,74)	0,00650** (2,16)	0,00656** (2,19)	0,00721** (5,28)
Des. Típ. de la función de densidad	—	—	0,00176***	0,014112* (1,93)
Penal (<i>ficticia</i>)	-0,01468 (-0,22)	-0,00347 (-0,04)	-0,00179 (-0,02)	-0,03415 (-0,46)
SCP (<i>ficticia</i>)	-0,19700** (-2,45)	-0,23741*** (-2,90)	-0,23740*** (-2,94)	-0,27972*** (-3,75)
Velocidad (<i>ficticia</i>)	0,02387 (0,34)	0,01693 (0,13)	0,01609 (0,13)	0,00871 (0,07)
Precipitación (<i>en mm</i>)	0,00015	0,00010 (1,05)	0,00010 (1,06)	0,57247D-04 (0,62)
Constante	3,94348*** (4,74)	3,93641*** (6,59)	3,69782*** (6,23)	3,87940*** (6,72)
Des. Típ. de la función de densidad	—	0,29143*** (11,57)	0,07931*** (3,44)	3,79332*** (18,67)
ln (Exposición)	1 (exposición)	1 (exposición)	1 (exposición)	1 (exposición)
Parámetro de dispersión de la distribución Binomial Negativa				
α	0,21697***	6,82904***	6,89976***	8,12130***
Otra información estadística / Criterios de selección				
Observaciones	387	387	387	387
LL (0)	-2714,9	-2714,9	-2714,9	-2714,9
LL (β)	-1506,3	-1475,3	-1474,7	-1468,9
ρ^2 corregido	0,4393	0,4504	0,4498	0,4509
AIC	3044,7	2984,5	2987,3	2981,7
BIC	3108,0	3051,8	3062,5	3068,8
Precisión predictiva				
DMA	15,29	12,51	12,44	10,99
RECM	32,60	29,67	29,53	25,57
Test de la razón de verosimilitud				

	(1)	(2)	(3)	(4)
	BNPF	BNPA-1	BNPA-2	BNPA-3
Parámetros estimados	16	17	19	22
Frente a modelo		(1) BNPF	(2) BNPA-2	(3) BNPA-2 / (2) BNPA-2
χ^2		62,14***	1,20	11,62*** / 2,82**
Grados de libertad		1	2	3 / 5
Modelo preferente		(2) BNPA-1	(2) BNPA-1	(4) BNPA-3

*** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$. Puntuaciones z entre paréntesis.

El modelo (3) considera los siguientes parámetros aleatorios: la constante, el precio de la gasolina y el PIB per cápita. Los resultados muestran que la desviación típica de los tres parámetros aleatorios es significativamente distinta de cero. De esta forma, una parte de la heterogeneidad no observada que se capturaba en el término constante del modelo (2), ahora es capturada por los otros dos coeficientes aleatorios. No obstante, el modelo (3) no parece mejorar el ajuste estadístico del (2). Tanto el ρ^2 corregido como las medidas de la DMA y la RECM apenas muestran una muy ligera mejora. Mientras que el AIC y el BIC suben de 2984,5 y 3051,8 a 2987,3 y 3062,5, respectivamente. Por otro lado, el test de razón de verosimilitud no favorece la elección del modelo (3) frente al (2).

El modelo (4) permite además una correlación entre los tres parámetros aleatorios definidos en el (2). En la Tabla 20 se muestran los elementos de la matriz triangular inferior Γ del modelo (4), utilizados para calcular la desviación típica de las variables con parámetros aleatorios del modelo. Todos los elementos de la matriz se muestran estadísticamente significativos, lo que aporta evidencias sobre su contribución a la aleatoriedad de los parámetros. En este caso, las medidas sobre el ajuste estadístico aportan evidencias mixtas. Por un lado, medidas como el ρ^2 corregido y el AIC obtienen los mejores resultados para este modelo: el ρ^2 corregido se ve incrementado hasta 0,4590 y el AIC es el menor de todos los modelos analizados, con un valor de 2981,7. Por otro lado, el BIC penaliza la mayor complejidad en la estructura de este modelo, y muestra unos resultados superiores respecto a los modelos (2) y (3). Aun así, el test de razón de verosimilitud parece decantar la elección del modelo hacia el (4). Además, atendiendo a los criterios de precisión predictiva, se observa una mejora respecto al modelo (2) del 12,15% en la DMA y del 13,82% en la RECM.

Tabla 20. Elementos de la matriz triangular inferior Γ del modelo (4).

	Constante	PIBcap	Gasolina
Constante	3,7933***[1,00]		
PIBcap	0,0895***[0,98]	0,0181***[1,00]	
Gasolina	-0,0135***[-0,96]	0,0040***[-0,88]	0,0009***[1,00]

*** $p < 0,01$, correlación de los parámetros aleatorios entre corchetes

En definitiva, los modelos que consideran algunos parámetros aleatorios mejoran el ajuste general y la capacidad predictiva que su contrapartida con parámetro fijos exclusivamente, corroborando así la Hipótesis H4. Concretamente, el modelo (4) incorpora seis parámetros adicionales a estimar respecto al modelo (1), y obtiene el mejor ajuste y capacidad predictiva. Por otro lado, el modelo (2) es el que produce el mayor incremento en la mejora del ajuste general del modelo, incorporando tan solo un parámetro extra a estimar. El desempeño estadístico de los modelos planteados en este caso de estudio para accidentes de motos se halla en sintonía con análisis previos planteados para accidentes de todo tipo de vehículos, como aquellos realizados por Caliendo *et al.* (2019), Chen y Tarko (2014) o Hou *et al.* (2018), en los cuales, los modelos de regresión binomial negativa con parámetros aleatorios correlacionados —similares al (4)— también mejoran ligeramente a aquellos con consideran solamente el término constante como parámetro aleatorio —similares al (2)—. Aun así, estos resultados también destacan que el modelo (2) puede ser una buena alternativa al (4) en los casos en los que se necesite un modelo más sencillo de calcular o interpretar.

Para evitar posibles inferencias sesgadas por la presencia de variables estadísticamente no significativas en el modelo, se vuelve a estimar el modelo (4) únicamente con las variables estadísticamente significativas, dando lugar a un nuevo modelo (5). Los resultados de este último modelo se muestran en la Tabla 21, mientras que en la Tabla 22 se indican los correspondientes elementos de la matriz Γ .

Tabla 21. Resultados del modelo seleccionado para el caso de estudio n.º 3: modelo (5), BNPA-3.

(5)	
BNPA-3	
Stock (en miles de € por km, ctes. 2015)	0,00017*** (4,54)
Inversión (en miles de € por km, ctes. 2015)	-0,00078*** (-3,90)
Mantenimiento (en miles de € por km, ctes. 2015)	-0,00282** (-2,53)
Ligeros (en millones de veh-km)	0,99851D-04*** (4,16)
Pesados (en millones de veh-km)	-0,00072*** (-4,69)
PIBcap (en miles de €, ctes. 2015)	-0,01727* (-1,81)
Des. Típ de la función de densidad	0,09727** (19,67)
Edad (en años)	-0,06116*** (-7,38)
Desempleo (en %)	-0,03360*** (-7,00)
Gasolina (en céntimos de € por litro)	0,00789*** (5,65)
Des. Típ. de la función de densidad	0,01739** (2,38)
SCP (ficticia)	-0,25769*** (-4,27)

(5)	
BNPA-3	
Constante	3,48528*** (6,87)
<i>Des. Típ. de la función de densidad</i>	3,9978*** (19,67)
ln (Exposición)	1 (exposición)
Parámetro de dispersión de la distribución Binomial Negativa	
α	8,18084***
Otra información estadística / Criterios de selección	
Observaciones	387
LL (0)	-2775,5
LL (β)	-1469,3
ρ^2 corregido	0,4641
AIC	2974,6
BIC	3045,8
Precisión predictiva	
DMA	10,01
RECM	25,47
Test de la razón de verosimilitud	
Parámetros estimados	18
Frente a modelo	RPNB-3 (4)
χ^2	0,87
Grados de libertad	4
Modelo preferente	RPNB-3 (5)

*** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$. Puntuaciones z entre paréntesis.

Tabla 22. Elementos de la matriz triangular inferior Γ del modelo (5).

	Constante	PIBcap	Gasolina
Constante	3,9978***[1,00]		
PIBcap	0,0956***[0,98]	0,0180***[1,00]	
Gasolina	0,0139***[0,96]	-0,0037***[0,90]	0,0010***[1,00]

*** $p < 0,01$, correlación de los parámetros aleatorios entre corchetes

Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Adicionalmente, los cuatro modelos propuestos han sido sometidos a un análisis de sensibilidad con el fin de comprobar la robustez de los resultados. En la Tabla 23 se muestran los resultados de este análisis para las principales variables de interés: inversión en construcción acumulada, en el año en curso, y el gasto en mantenimiento. Se incluye solamente los resultados correspondientes al modelo (5) ya que no se han detectado variaciones considerables, de estas o del resto de variables, en los otros modelos.

Tabla 23. Análisis de sensibilidad del modelo (5).

	Variaciones del Modelo (5): BNPA-3				
	(i) T = 11	(ii) T = 9	(iii) d = 1%	(iv) d = 3%	(v) Efectos aleatorios
Stock (<i>en miles de € por km, ctes, 2015</i>)	0,00017*** (4,54)	0,00016*** (4,05)	0,00016*** (4,38)	0,00017*** (4,26)	0,00014*** (3,59)
Inversión (<i>en miles de € por km, ctes, 2015</i>)	-0,00076*** (-3,90)	-0,00076*** (-3,90)	-0,00076*** (-3,82)	-0,00077*** (-3,79)	-0,00071*** (-3,38)
Mantenimiento (<i>en miles de € por km, ctes, 2015</i>)	-0,00292*** (-2,53)	-0,00293*** (-2,58)	-0,00281** (-2,48)	-0,00285** (-2,53)	-0,00308*** (-2,61)
Ligeros (<i>en millones de veh-km</i>)	0,00011*** (4,16)	0,6782D-04** (2,54)	0,81404D-04*** (3,34)	0,84158D-04*** (3,48)	0,77135D-04*** (3,16)
Pesados (<i>en millones de veh-km</i>)	-0,00076*** (-4,69)	-0,00063*** (-3,90)	-0,00068*** (-4,43)	-0,00070*** (-4,54)	-0,00076*** (-4,90)
PIBcap (<i>en miles de € por km, ctes, 2015</i>)	-0,02069** (-1,81)	-0,02175** (-2,28)	-0,02192** (-2,31)	-0,02165** (-2,28)	-0,02819*** (-2,98)
<i>Des, Típ de la función de densidad</i>	0,09151*** (19,67)	0,09267*** (19,67)	0,09432*** (19,67)	0,09404*** (19,67)	0,07935*** (19,67)
Edad (<i>en años</i>)	-0,06004*** (-7,38)	-0,06029*** (-7,22)	-0,05988*** (-7,23)	-0,05963*** (-7,21)	-0,05411*** (-6,71)
Desempleo (<i>en</i>)	-0,03477***	-0,03461***	-0,03457***	-0,03455***	-0,03711***

Variaciones del Modelo (5): BNPA-3					
	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)
	T = 11	T = 9	d = 1%	d = 3%	Efectos aleatorios
%)					
	(-7,00)	(-7,18)	(-7,24)	(-7,23)	(-7,80)
Gasolina (en céntimos de € por litro)	0,00793***	0,00690**	0,00738**	0,00739**	0,00661**
	(2,64)	(2,23)	(2,46)	(2,47)	(2,17)
<i>Des, Típ, de la función de densidad</i>	0,01414***	0,01403***	0,013964***	0,013963***	0,012684***
	(19,68)	(19,68)	(19,68)	(19,67)	(19,67)
SCP (ficticia)	-0,25624***	-0,24113***	-0,25213***	-0,25121***	-0,23802***
	(-4,27)	(-3,94)	(-4,16)	(-4,15)	(-3,89)
Constante	3,55582***	3,72465***	3,64494***	3,62932***	3,73597***
	(6,87)	(7,24)	(7,14)	(7,11)	(7,33)
<i>Des, Típ, de la función de densidad</i>	3,78587***	3,84498***	3,87589***	3,86815***	3,29866
	(19,67)	(19,67)	(19,67)	(19,67)	(19,67)
ln (Exposición)	1	1	1	1	1
Parámetro de dispersión de la distribución Binomial Negativa					
α	8,23882***	8,00118***	8,11242***	8,09880***	7,83900***
Desviación típica de los efectos aleatorios					
Provincia	—	—	—	—	0,09083***
Año	—	—	—	—	0,02190
Otra información estadística					
Observaciones	387	387	387	387	387
LL (0)	-2755,35853	-2799,05559	-2775,27200	-2775,81717	-2775,48716
LL (β)	-1468,74	-1470,56668	-1469,21207	-1469,40519	-1470,36480
ρ^2 corregido	0,46	0,48	0,47	0,47	0,47
AIC	2973,5	2977,1	2974,4	2974,8	2980,7
BIC	3044,7	3048,4	3045,7	3046,1	3059,9

Notas: Las columnas (i) y (ii) utilizan diferente número de años (T) para calcular la inversión en construcción acumulada. Las columnas (iii) y (iv) usan diferentes tasas de depreciación (d) a la hora de calcular la inversión acumulada. La columna (v) incorpora efectos aleatorios por provincia y año. *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$

Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por tanto, el modelo de siniestralidad de motos —Modelo (5): BNPA-3— adquiere la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\widehat{\text{Accidentes}} = & \exp(3,48528 + 0,00017 \text{ Stock} - 0,00078 \text{ Inversión} \\ & - 0,00282 \text{ Mantenimiento} + 0,99851 \cdot 10^{-4} \text{ Ligeros} \\ & - 0,00072 \text{ Pesados} - 0,01727 \text{ PIBcap} - 0,06116 \text{ Edad} \\ & - 0,03360 \text{ Desempleo} + 0,00789 \text{ Gasolina} - 0,25769 \text{ SCP} \\ & + 1 \ln(\text{Exposición}))\end{aligned}\quad (63)$$

Como se indicó en el capítulo de metodología, en la ecuación (63) se puede comprobar que el número esperado de accidentes está escalado por la variable de exposición (*Exposición*), ya que se ha añadido en su forma logarítmica y su coeficiente se ha restringido a uno. Dicho de otra forma, se puede definir la tasa de accidentes estimada como:

$$\widehat{\text{Accidentes}}^* = \frac{\widehat{\text{Accidentes}}}{\text{Expos}} \quad (64)$$

Y, aprovechando las propiedades algebraicas básicas, el modelo estimado se puede reescribir en función de esta tasa de accidentes como:

$$\begin{aligned}\widehat{\text{Accidentes}}^* = & \exp(3,48528 + 0,00017 \text{ Stock} - 0,00078 \text{ Inver} - 0,00282 \text{ Manten} \\ & + 0,99851 \cdot 10^{-4} \text{ Ligeros} - 0,00072 \text{ Pesados} - 0,01727 \text{ PIBcap} \\ & - 0,06116 \text{ Edad} - 0,03360 \text{ Desempleo} + 0,00789 \text{ Gas} \\ & - 0,25769 \text{ SCP})\end{aligned}\quad (65)$$

5.3.1 Discusión de resultados

- Recursos económicos destinados a carreteras

Las variables de recursos económicos destinados a las carreteras —inversión en construcción acumulada, en el año en curso, y el gasto en mantenimiento— han mostrado resultados significativos en todos los modelos. Respecto a las dos variables de inversión en construcción (inversión acumulada durante los últimos diez años e inversión anual), sus coeficientes se muestran consistentes a lo largo de los cinco modelos planteados. Por otro lado, la relación de ambas variables respecto a los accidentes esperados por millón de veh-km es de signo opuesto. Así pues, a corto plazo —reflejado por la inversión anual— la inversión en construcción muestra un efecto beneficioso en la reducción de la tasa de accidentes de motos. No obstante, a largo plazo—reflejado por la inversión acumulada—este efecto parece revertirse y producir una relación residual directa con la ocurrencia de accidentes, aunque de una magnitud entre 3 y 4 veces menor que el efecto a corto plazo. En este sentido, el efecto neto sí muestro un efecto beneficioso sobre la seguridad vial, cumpliendo la hipótesis H1. El cambio de signo en la influencia de la inversión en construcción puede deberse a algún tipo de efecto de compensación de riesgo (Peltzman, 1975; Sánchez González *et al.*, 2018). También, algunos estudios previos han justificado que los conductores de V2RM podrían adoptar un comportamiento más peligroso ante situaciones que teóricamente son más convenientes en términos de seguridad vial, por ejemplo: cuando perciben unas condiciones

del entorno excelentes (Perez-Fuster *et al.*, 2013), un estado seco de la superficie de rodadura (Shaheed *et al.*, 2013), u otros factores favorables referentes al estado del pavimento (Geedipally *et al.*, 2011; Xin *et al.*, 2017a). No obstante, sería deseable un futuro análisis en mayor detalle sobre este cambio de signo en el efecto a largo plazo. Por otro lado, el gasto en mantenimiento de carreteras mantiene un signo negativo significativo en los cuatro modelos de parámetros aleatorios, mientras que en el modelo (1) no obtiene un resultado significativamente distinto de cero. Por lo tanto, con este resultado se pone de manifiesto el efecto beneficioso del gasto en mantenimiento sobre la seguridad de las motocicletas, corroborando la hipótesis H2.

De cara a contextualizar los anteriores resultados, la pasada década se ha caracterizado por el gran descenso en las inversiones destinadas a las carreteras y la pérdida de calidad de las mismas, tanto en España como en la mayoría de países europeos (European Investment Bank, 2018). Esta situación ha puesto de manifiesto la existencia de un creciente déficit el mantenimiento de las carreteras (European Parliament: DG for Internal Policies, 2014) y sus consecuencias sobre la seguridad vial. Por otro lado, la mayoría de proyectos de mejora de carreteras apuntan a un ratio coste-beneficio positivo cuando se considera como beneficio la reducción en el número de accidentes (Claros *et al.*, 2022), lo cual debe también tenerse en cuenta a la hora de dedicar recursos económicos para las mismas. En el caso de España, la Asociación Española de la Carretera cifra el déficit acumulado en conservación por las administraciones central y regionales en 73.370 €/km (AEC, 2020). Por su parte, Rojo *et al.* (2018) señalaron que el ahorro de costes en mantenimiento no supone un beneficio económico real si se tienen en cuenta los accidentes de tráfico asociados a un peor estado de la carretera. Por lo tanto, los resultados del presente estudio vienen a justificar estadísticamente todos estos aspectos. Así pues, tanto la inversión en construcción como el gasto en mantenimiento han mostrado tener efectos beneficiosos en la reducción de los accidentes de motos. Además, estos resultados se hallan en línea con algunos estudios que señalaban este efecto de los recursos económicos para el conjunto de vehículos, bien por la inversión en construcción (Nguyen-Hoang y Yeung, 2014; Sánchez González *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2019) o bien por el gasto en mantenimiento (Fridstrøm e Ingebrigtsen, 1991; Houston *et al.*, 1995; Sánchez González *et al.*, 2018).

▪ Tráfico de vehículos ligeros y pesados

Respecto a las variables de tráfico consideradas, el volumen de tráfico de vehículos ligeros muestra una relación directa con el aumento de los accidentes de motos. A falta de estudios específicos sobre motos, este resultado puede decirse que está en línea con otros estudios que han considerado el tráfico de todo tipo de vehículos como variable independiente (Abdul Manan *et al.*, 2013; Gabauer y Li, 2015; Xin *et al.*, 2017b). Como explicación de esta relación, Pai (2011) señaló que la principal causa de accidentes entre coches y V2RM es la falta de respeto a la prioridad de paso de los V2RM. De esta forma, un aumento del tráfico de vehículo ligeros puede generar un incremento de este tipo de infracción y, consecuentemente, de accidentes entre V2RM y otro tipo de vehículos. Por su parte, Schneider *et al.* (2010) también hallaron un incremento en el tipo de accidentes de V2RM en los que no hay otro

vehículo implicado—como salida de vía, vuelco, etc.—cuando aumentaba el tráfico. Los autores argumentaron que podía deberse a un cambio del comportamiento de los conductores de V2RM ante la presencia de vehículos ligeros en carreteras con altos volúmenes de tráfico. Además, en línea con las interacciones propias del tráfico, también es necesario considerar la capacidad de los conductores para detectar a los V2RM. Hancock *et al.* (1990) demostraron que los conductores de coches tienen una capacidad baja a la hora de detectar una motocicleta. Otros estudios han contrastado dicha afirmación, tanto en función de las características del observador (Rogé *et al.*, 2012; Wulf *et al.*, 1989) como de las cualidades físicas del objeto observado, los V2RM (Gershon *et al.*, 2012; Gershon y Shinar, 2013). Por tanto, todas estas situaciones son aplicables al presente caso de estudio, y como consecuencia, es esperable un aumento de la frecuencia de accidentes de motos cuando se produzca un incremento del tráfico de vehículos ligeros.

Por otro lado, los resultados muestran una relación de signo negativo para el tráfico de vehículos pesados. Esta reducción de la frecuencia de accidentes puede deberse a una mayor precaución por parte de los conductores de motos ante el aumento del tráfico de vehículos pesados. Esta relación puede parecer contraintuitiva, al menos respecto al conocimiento existente de que la severidad de un accidente aumenta cuando algún vehículo pesado está involucrado en el mismo (Jung *et al.*, 2013; Savolainen y Mannering, 2007). Sin embargo, todavía hay una falta de conocimiento en la literatura acerca de los efectos tanto de las maniobras de adelantamiento de V2RM a vehículos pesados (Vlahogianni, 2014), como de los patrones de maniobras e interacciones de los V2RM con este tipo de vehículos en flujos de tráfico mixto (Das y Maurya, 2017). Además, es necesario contextualizar el ámbito de estudio, ya que la red de carreteras analizada soporta más del 60% del tráfico de pesados del total de España, oscilando el porcentaje de vehículos pesados entre el 13% y 16% para el periodo de estudio (Ministerio de Fomento, 2016). Así pues, estudios como los de Chen *et al.* (2020) y Zhang *et al.* (2019) han llegado a asociar la presencia de una mayor proporción de vehículos pesados en carreteras con grandes volúmenes de tráfico con una disminución de la velocidad media, lo cual puede contribuir a una mejora de la seguridad en general, y de los conductores de motocicletas en particular. No obstante, este resultado, referente a la interacción entre moto y vehículo pesado, y sus consecuencias en la seguridad vial, debería investigarse en mayor profundidad en el futuro.

▪ Composición de la red viaria

La proporción de vías de gran capacidad muestra una relación de signo negativo en los cuatro primeros modelos, aunque en los modelos (4) y (5) deja de ser significativa. Este signo puede explicarse teniendo en cuenta que, algunos factores de diseño como secciones con calzadas separadas, amplios radios de curvatura, limitación de accesos o menor cantidad de elementos en los márgenes de la vía parecen contribuir a que esta clase de carreteras proporcione una mayor seguridad a los conductores de motos, según Daniello y Gabler (2011) y Shankar y Mannering (1996). Adicionalmente, en las vías de gran capacidad se produce un aumento de la visibilidad entre motos y vehículos ligeros que permite anticipar la interpretación de los movimientos mutuos y puede prevenir algún accidente en los que se falla al detectar al V2RM.

Según Walker *et al.* (2011), esta compatibilidad entre vehículos ligeros y V2RM no se da en otro tipo de carreteras, como las convencionales interurbanas, por lo que la circulación por vías de gran capacidad implica una mejora de la seguridad derivada de una mayor facilidad a la hora de interpretar de los movimientos mutuos.

- Características socioeconómicas y demográficas

De las variables socioeconómicas y demográficas consideradas, el PIB per cápita, la edad mediana y la tasa de desempleo muestran relaciones significativas de signo negativo en todos los modelos. Respecto a la primera, Wijnen y Rietveld (2015) establecieron que la relación entre el nivel de renta de la sociedad y los accidentes de tráfico puede vincularse a través de cuatro mecanismos: volumen de tráfico, composición del tráfico, comportamiento del usuario, e inversiones en mejora de la seguridad. Como ya se han considerado tanto el volumen de tráfico como la composición del mismo dentro de los modelos, la relación de signo negativo entre renta per cápita y accidentes puede deberse a cambios en el comportamiento de los usuarios u a otras mejoras inducidas de seguridad vial. Así, el aumento del nivel de riqueza puede contribuir a la disminución del número de accidentes de diversas formas: transferencia usuarios de motocicletas—como medio más asequible pero con alto riesgo—a usuarios de coches—como medio más caro pero de menor riesgo (Poi *et al.*, 2021)—, mayor concienciación sobre comportamientos de riesgo provocada por un mejor acceso a la educación (Law *et al.*, 2013), o más disponibilidad de recursos económicos para diversos programas de seguridad vial como campañas de vigilancia de tráfico o publicidad en medios de comunicación (Guria, 1999). En este sentido, los resultados de la relación inversa están en línea con la existencia de una curva tipo Kuznets entre desarrollo económico y seguridad vial de motos, como apuntaban Nishitaten y Burke (2014) y Sirajudeen *et al.* (2022). Este tipo de curva en forma de *U* invertida, vincula en un primer lugar el incremento de la riqueza con un incremento de los accidentes (países en vías de desarrollo) y, llegados a un determinado nivel, esta relación se revierte, asociándose un incremento de la riqueza con una disminución del número de accidentes. Por ello, en el caso de España (como país que ya ha alcanzado dicho punto de inflexión) un aumento de la riqueza puede asociarse con un mayor nivel de educación vial y una demanda inducida de mejoras en la seguridad vial (Law *et al.*, 2013), lo cual puede traducirse en un menor número de accidentes.

La edad también muestra una relación inversa respecto a la accidentabilidad, en línea con la literatura consultada, la cual señala a este factor como de especial importancia para la seguridad de los motociclistas (Allen *et al.*, 2017; Bjørnskau *et al.*, 2012; Hefny *et al.*, 2012; Theofilatos y Yannis, 2014b; Yannis *et al.*, 2005). Por su parte, Elvik (2010) ahonda en el marco teórico de esta asociación y atribuye el mayor riesgo de la población joven a una mezcla de factores biológicos, sobreestimación de las capacidades y espíritu de rebeldía. Además, los jóvenes suelen ocupar una posición socioeconómica comparativamente más baja que la de otros estratos poblacionales, lo que también implica un riesgo hasta 2,5 veces mayor respecto a aquellos conductores de posición socioeconómica más alta (Zambon y Hasselberg, 2006).

La tasa de desempleo también ha mostrado una relación inversa respecto a los accidentes de motos, corroborando la Hipótesis H5. Esto puede explicarse teniendo en cuenta que el incremento de la tasa de desempleo puede provocar tanto una reducción del volumen de tráfico como variaciones en la composición del mismo. Así pues, la relación inversa entre la tasa de desempleo y la siniestralidad vial ha sido ampliamente reflejada en la literatura (Economou *et al.*, 2008; Gerdtham y Ruhm, 2006; He, 2016; Neumayer, 2004; Ruhm, 2000; Safaei *et al.*, 2021; Wagenaar, 1984; Wegman *et al.*, 2017). Además, Wegman *et al.* (2017) indicaron como razones para dicha relación una reducción desproporcionada de conductores de alto riesgo, particularmente los jóvenes, y también algunos cambios en el comportamiento de los conductores. Así pues, en España, durante el periodo de estudio, los efectos de la Gran Recesión provocaron un aumento de la tasa de desempleo entre la población joven mayor que entre cualquier otro grupo de edad (Bell y Blanchflower, 2011). Por ello, teniendo en cuenta que los motociclistas jóvenes tienen una mayor probabilidad de sufrir un accidente (Theofilatos y Yannis, 2014), un aumento de la tasa de desempleo puede influir en una disminución en la tasa de accidentes de motos. Por último, el incremento de la tasa de desempleo, y el deterioro de las condiciones económicas en general, puede modificar el comportamiento de los conductores, los cuales adoptarían una conducción más precavida y segura ante la posibilidad de verse sancionados por infracciones de tráfico, tal y como hallaron Pulido *et al.* (2021).

En cuanto al precio de la gasolina, la relación significativa de signo positivo se muestra en todos los modelos excepto el primero. Este efecto puede deberse a que el incremento del precio de la gasolina puede motivar un mayor uso de motos como sustitución más económica al uso de coches (Wilson *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2015), especialmente en países desarrollados en los que, históricamente, el uso de motos era bajo (Zhang y Burke, 2021). Además, también puede tenerse en cuenta que el aumento del precio del combustible afecta en primer lugar a aquellos usuarios de un nivel socioeconómico menor, que a su vez son los que generalmente muestran un comportamiento más arriesgado en la conducción, como pudieron comprobar Hasselberg *et al.* (2005) y Zambon y Hasselberg (2006). Todos estos factores explicativos pueden aplicarse al ámbito de estudio que se está tratando, y avalan el resultado obtenido. Otros estudios que relacionan el incremento del precio de la gasolina con una mayor siniestralidad de V2RM, como Hyatt *et al.* (2009) y Safaei *et al.* (2021), señalan como limitación de los mismos la no consideración de la variable de exposición de forma específica para V2RM, dato que en el presente caso de estudio sí se ha incluido. Por tanto, el presente trabajo aporta nuevas y más robustas evidencias a la literatura —al considerar la exposición al riesgo, variable fundamental en los estudios sobre seguridad vial— sobre la relación directa entre el precio de la gasolina y el aumento del número de accidentes de motos. Por último, según Hou *et al.* (2021) la correlación de signo positivo entre los parámetros aleatorios del PIB per cápita y el precio de la gasolina (Tabla 22), implica que las interacciones entre la heterogeneidad no observada tienen un efecto homogéneo sobre la tasa de accidentes de motos. Un ejemplo podría ser que un incremento conjunto del precio de la gasolina y del PIB per cápita provoque un aumento de usuarios de motocicletas de menor nivel socioeconómico (asociados a un comportamiento más peligroso), y que, a su vez, el aumento de la renta posibilite el acceso a motocicletas de mayor cilindrada, con lo cual, siguiendo los

resultados de Dubois *et al.* (2020), se incrementarían también las probabilidades de que se produzcan comportamientos de mayor riesgo en determinados grupos de edad.

- Variables legislativas

Respecto a los cambios normativos, solo la variable *SCP* ha mostrado resultados significativos, demostrando un efecto beneficioso sobre la reducción de accidentes de motos (confirmando la Hipótesis H6). Esta variable representa dos cambios legislativos que entraron en vigor a finales de 2009: la modificación del procedimiento sancionador y la modificación del reglamento de circulación. Estas modificaciones actualizaron el sistema de carnet por puntos vigente desde 2006 y restringieron el acceso a determinadas licencias de motocicletas y ciclomotores. En línea con el resultado obtenido, la implementación de un sistema de carnet por puntos ha demostrado su eficacia a la hora de mejorar la seguridad vial en distintos países (Abay, 2018; De Paola *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2018; Zambon *et al.*, 2007), aunque algunos estudios indican que esta eficacia puede desvanecerse pasado un tiempo (Castillo-Manzano y Castro-Nuño, 2012; Izquierdo *et al.*, 2011). Por ello, la periódica actualización de esta normativa resulta necesaria para mantener un impacto beneficioso en la seguridad vial. Por su parte, la variable *Penal* —que representa el endurecimiento del Código Penal para infracciones de tráfico— muestra también un signo negativo pero no significativo en los modelos del (1) al (4). Por último, la variable *Velocidad* —que representa la modificación del límite velocidad genérico para autopistas y autovías realizada en 2011— tampoco ha resultado significativa en ningún modelo. Llegado este punto, no es descartable que parte de la influencia de estas dos modificaciones normativas haya sido recogida por la variable *SCP*, que también incluía un endurecimiento de las sanciones.

- Variable meteorológica

Por último, no se han obtenido resultados significativos para la precipitación media anual en ninguno de los modelos planteados. Respecto a su influencia en estudios generales de seguridad vial, aunque el signo positivo entre precipitación y aumento de accidentes parece ser el más frecuente en la literatura, como señalaron Theofilatos y Yannis (2014a), esta relación puede cambiar de signo según el nivel de agregación temporal de los datos (Eisenberg, 2004) o incluso el tipo de carretera (Bergel-Hayat *et al.*, 2013). Por tanto, la falta de significancia estadística mostrada en el presente caso de estudio debe tomarse con cautela y no extraer conclusiones precipitadas sobre una ausencia de relación entre las precipitaciones y la tasa de accidentes de motocicletas.

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES

Capítulo 6:

6 CONCLUSIONES

El presente capítulo resume las principales conclusiones derivadas de la Tesis Doctoral. Las conclusiones han sido desglosadas en: conclusiones generales, conclusiones del análisis en ámbito europeo y conclusiones del análisis en ámbito español para motocicletas. Finalmente, también se incluye una breve reseña sobre las principales aportaciones de la tesis.

El objetivo principal de la tesis ha consistido en analizar la influencia de las inversiones en carreteras sobre la seguridad vial desde un punto de vista macro. Una serie de carencias detectadas en la literatura previa han motivado el desarrollo de los seis objetivos específicos indicados en el capítulo 3. Todos estos objetivos han sido finalmente alcanzados a lo largo del desarrollo de la Tesis Doctoral. Para ello, el análisis se ha estructurado en tres casos de estudio que abarcan dos ámbitos territoriales distintos: internacional, a escala de países europeos (NUTS-0); y nacional, a escala de provincias españolas (NUTS-3). A continuación, se presentan las conclusiones del análisis.

Conclusiones generales

A partir de los resultados obtenidos en los tres casos de estudio presentados en la tesis doctoral, las principales conclusiones generales son las siguientes:

- I. Desde un punto de vista macro, tanto a nivel europeo como español, los recursos económicos dedicados a las carreteras, representados por la inversión en construcción y por el gasto en mantenimiento, muestran una relación estadísticamente significativa con los tres indicadores de siniestralidad vial analizados: tasa de fallecidos, tasa de accidentes con heridos y tasa de accidentes de motocicletas.
- II. El gasto efectuado en mantenimiento de carreteras refleja un efecto beneficioso sobre la seguridad vial en todos los modelos econométricos planteados en el presente trabajo de investigación.
- III. La inversión dedicada a la construcción de nueva infraestructura viaria muestra un efecto mixto sobre la seguridad vial, el cual se encuentra condicionado por el nivel de desarrollo socioeconómico del propio país en el que se ejecuta la inversión.

Conclusiones del análisis en ámbito europeo

Por otro lado, a continuación, se exponen aquellas conclusiones específicas derivadas del análisis en ámbito europeo:

- IV. El gasto en mantenimiento tiene un efecto beneficioso sobre la seguridad vial que se muestra en el año posterior al de ejecución del gasto. Así pues, un incremento del gasto en mantenimiento de carreteras equivalente a mil euros por kilómetro de red se asocia a una reducción de 0,174 accidentes con heridos por cada mil millones de v-km recorridos.
- V. Atendiendo a la clasificación de los países según el nivel de renta per cápita, el gasto en mantenimiento de carreteras muestra un efecto reductor en la tasa de mortalidad en ambos grupos, siendo este efecto cuantitativamente superior en los PRA que en los PRB. Concretamente, cada mil euros por kilómetro de red en mantenimiento se asocian a una reducción de 0,053 fallecidos por mil millones de v-km en los PRA, mientras que el mismo gasto se relaciona con una disminución de la tasa de mortalidad de 0,022 en los PRB.
- VI. La influencia mostrada por la inversión en construcción de carreteras sobre la tasa de mortalidad varía de signo según el nivel de riqueza del ámbito de estudio. De esta forma, en los PRA la inversión en construcción refleja un efecto perjudicial (aumento del número de víctimas), mientras que en PRB produce un efecto beneficioso (reducción del número de víctimas). En términos monetarios para los PRA, mil euros de inversión en construcción por kilómetro de red se asocian a un aumento de la tasa de mortalidad equivalente a 0,019 fallecidos por mil millones de v-km. Por el

contrario, en los PRB la misma cantidad de inversión en construcción se vincula a una reducción de la tasa de mortalidad correspondiente a 0,017.

- VII. En los PRB, los recursos económicos dedicados a carreteras producen un efecto beneficioso sobre la tasa de mortalidad tanto para la inversión en construcción, como para el gasto en construcción y mantenimiento. Mientras tanto, en los PRA, el efecto reductor de la mortalidad se produce únicamente para la variable correspondiente al gasto en mantenimiento. Asimismo, en los PRB el incremento anual de la proporción de vías de gran capacidad muestra un efecto reductor de la siniestralidad vial, el cual deja de ser significativo en los PRA. Esta situación deja entrever que, llegados a un cierto punto de desarrollo de la infraestructura viaria, el potencial de mejora de la seguridad vial de la asignación de recursos económicos a carreteras se traslada a las actividades de mantenimiento de la red.

Conclusiones del análisis en ámbito español para motocicletas

Por último, las conclusiones derivadas del análisis de la siniestralidad de motocicletas en el ámbito español son las siguientes:

- VIII. Los recursos económicos destinados a carreteras producen un efecto beneficioso sobre la seguridad vial de los motoristas. Concretamente, los efectos mostrados a corto plazo por el gasto en mantenimiento muestran que, por cada mil euros invertidos por kilómetro de red, es esperable una reducción media del 0,282% en la tasa de accidentes (número de accidentes de motocicletas con heridos por millón de vehículos-km). Asimismo, la inversión en construcción muestra también un efecto beneficioso a corto plazo, aunque de menor magnitud: un aumento de mil euros, por kilómetro de red, en la cantidad destinada a construcción de nuevas carreteras se espera que repercuta en una reducción media del 0,075% en la tasa de accidentes. No obstante, este efecto beneficioso de la inversión en construcción parece matizarse a largo plazo —reflejado por la inversión acumulada—, produciendo una relación residual directa con la ocurrencia de accidentes, equivalente a un incremento esperado del 0,018% en la tasa de accidentes por cada mil euros de inversión acumulada por kilómetro de red.
- IX. Los modelos de regresión binomial negativa que consideran algunos parámetros aleatorios (BNPA-1, BNPA-2 y BNPA-3) mejoran el ajuste general y la precisión predictiva que su contrapartida con parámetros fijos exclusivamente (BNPF).
- X. El modelo de regresión binomial negativa con constante aleatoria (BNPA-1) puede ser una alternativa interesante desde un punto de vista práctico o de eficacia. Esto se debe a que consigue una mejora considerable tanto en el ajuste general del modelo como en la precisión predictiva incorporando solamente un parámetro adicional a estimar respecto al modelo BNPF.

- XI. Algunas conclusiones adicionales a nivel macro, y enmarcadas en el ámbito de la RCE, sobre la siniestralidad de motocicletas:
- i. La composición del tráfico afecta también a la seguridad de las motocicletas. En este estudio se ha llegado a vincular un aumento del tráfico de vehículos ligeros con un incremento de la accidentabilidad de motos, y el efecto opuesto con el tráfico de vehículos pesados;
 - ii. De forma similar a lo reflejado en la literatura referente a todo tipo de vehículos, el aumento del desempleo transfiere un efecto beneficioso en términos de seguridad vial a las motocicletas. Un incremento del 1% en la tasa de desempleo se asocia a una disminución del 3,30% en la tasa de siniestralidad;
 - iii. La actualización del sistema de carnet por puntos y las restricciones de acceso a determinadas licencias de motocicletas y ciclomotores reflejan un gran impacto sobre la tasa de accidentes, con una tasa de disminución equivalente al 22,72% para el periodo comprendido entre 2010 y 2013.

Principales aportaciones de la Tesis Doctoral

En la literatura previa, las inversiones en carreteras han sido vinculadas tanto con la reducción como con el aumento de la siniestralidad vial. Además, la falta de homogeneidad a la hora de incorporar otro tipo de variables a los modelos —socioeconómicas, relacionadas con la red de carreteras, con el tráfico y de carácter legislativo— y el hecho de que los estudios se han planteado para un país en concreto, han limitado en gran medida la capacidad de poder extraer unas conclusiones generales. Por ello, el análisis efectuado en la presente Tesis Doctoral, en el que se plantea por primera vez un análisis macro a nivel internacional con datos de 23 países, aporta nuevas y más robustas evidencias sobre la relación existente entre los recursos económicos destinados a las carreteras y las cifras de accidentes y fallecidos en las mismas.

Por otro lado, es la primera vez en la literatura en la que se ha analizado la influencia de las inversiones efectuadas en carreteras sobre la seguridad vial de un grupo de usuarios especialmente vulnerable: las motocicletas. Asimismo, se han estudiado una serie de variables adicionales que no se habían estudiado previamente en modelos de siniestralidad de V2RM junto a la exposición al riesgo específica para los mismos y relativa a su volumen de tráfico. Y, por último, también se ha validado el empleo de diversas configuraciones de modelos de regresión binomial negativa con parámetros aleatorios, los cuales no habían sido estudiados en el contexto de los V2RM con variables que representen la exposición al riesgo de los mismos y relativa al volumen de tráfico.

CHAPTER 6.

CONCLUSIONS

Chapter 6:

6. CONCLUSIONS

This chapter summarizes the main conclusions derived from the Doctoral Thesis. The conclusions have been broken down into general conclusions, conclusions of the analysis at the European level, and conclusions of the analysis at the Spanish level for motorcycles. Finally, a brief review of the thesis's main contributions is also included.

The main objective of the thesis has been to analyze the influence of road investments on road safety from a macro point of view. A series of shortcomings detected in the previous literature have motivated the development of the six specific objectives indicated in Chapter 3. For this purpose, the analysis was structured in three case studies covering two different territorial scopes: international, at the level of European countries (NUTS-0), and national, at the level of Spanish provinces (NUTS-3). The conclusions of the analysis are presented below.

General conclusions

From the results obtained in the three case studies presented in the Doctoral Thesis, the general conclusions are the following:

Chapter 6: CONCLUSIONS

- I. From a macro point of view, both at the European and Spanish levels, the economic resources devoted to roads, represented by investment in construction and by expenditure on maintenance, show a statistically significant relationship with the three road crash indicators analyzed: fatality rate, injury crash rate, and motorcycle crash rate.
- II. Spending on road maintenance reflects a beneficial effect on road safety in all the econometric models presented in this research work.
- III. Investment in the construction of new road infrastructure has a mixed effect on road safety, conditioned by the country's level of socioeconomic development.

Conclusions of the analysis at the European level

On the other hand, the specific conclusions derived from the analysis at the European level are presented below:

- IV. Spending on maintenance has a beneficial effect on road safety, which is shown in the year after the expenditure is made. Thus, an increase in road maintenance expenditure equivalent to one thousand euros per kilometer of the network is associated with a reduction of 0.174 crashes with injuries per billion v-km traveled.
- V. Considering the classification of countries according to the level of per capita income, spending on road maintenance shows a reducing effect on the fatality rate in both groups, this effect being quantitatively higher in the PRA (*high-income countries*) than in the PRB (*low-income countries*). Specifically, each thousand euros per kilometer of network maintenance is associated with a reduction of 0.053 fatalities per billion v-km in PRAs, while the same expenditure is associated with a decrease in the mortality rate of 0.022 in PRBs.
- VI. The impact of road construction investment on the fatality rate is not uniform across different wealth areas. In PRAs, such investment leads to an increase in the number of victims, while in PRBs, it results in a reduction. For PRAs, one thousand euros of construction investment per kilometer of network is associated with an increase in the fatality rate equivalent to 0.019 fatalities per billion v-km. In contrast, in PRBs, the same investment is linked to a reduction in the mortality rate corresponding to 0.017.
- VII. In the PRBs, the economic resources dedicated to roads produce a beneficial effect on the mortality rate both for investment in construction and for maintenance expenditure. Meanwhile, in PRAs, the mortality-reducing effect occurs only for the variable corresponding to maintenance spending. Likewise, in the PRBs, the annual increase in the proportion of high-capacity roads shows a reduction in road fatality rates, which is no longer significant in the PRAs. This situation suggests that, at a certain point in road infrastructure development, the potential for improving road

safety from allocating economic resources to roads is transferred to the network's maintenance activity.

Conclusions of the analysis at the Spanish level for motorcycles

Finally, the conclusions derived from the analysis of the motorcycle crash rate in Spain are as follows:

- VIII. The economic resources allocated to roads have a beneficial effect on the road safety of motorcyclists. Specifically, the short-term effects of spending on maintenance show that, for every thousand euros invested per kilometer of the network, an average reduction of 0.282% in the crash rate (number of motorcycle crashes with injuries per million vehicle-km) is to be expected. Likewise, investment in construction also shows a beneficial effect in the short term. However, of a lesser magnitude, an increase of one thousand euros per kilometer of the network in the amount allocated to new road construction is expected to result in an average reduction of 0.075% in the crash rate. Nevertheless, this beneficial effect of investment in construction seems to be nuanced in the long term-reflected by the accumulated investment-producing a direct residual relationship with the occurrence of crashes, equivalent to an expected increase of 0.018% in the crash rate per thousand euros of accumulated investment per kilometer of network.
- IX. The negative binomial regression models that consider some random parameters (BNPA-1, BNPA-2, and BNPA-3)²⁰ have better overall fit and predictive accuracy than their counterparts with fixed parameters only (BNPF)²¹.
- X. The negative binomial regression model with random intercept (BNPA-1) may be a suitable alternative from a practical or efficiency point of view. This is because it considerably improves overall model fit and predictive accuracy by incorporating only one additional parameter to be estimated with respect to the BNPF model.
- XI. Some additional conclusions at the macro level, and framed within the scope of the Spanish's main road network (RCE), on the motorcycle crash rate:
 - i. Traffic composition also affects motorcycle safety. This study has come to link an increase in light vehicle traffic with an increase in motorcycle crash rates and the opposite effect with heavy vehicle traffic;

²⁰ BNPA-1: Random intercept negative binomial model; BNPA-2: Uncorrelated random parameters negative binomial model; BNPA-3: Correlated random parameters negative binomial model.

²¹ BNPF: Fixed parameters negative binomial model.

- ii. Similar to what is reflected in the literature concerning all types of vehicles, an increase in unemployment benefits motorcycles in terms of road safety. A 1% increase in the unemployment rate is associated with a 3.30% decrease in the crash rate;
- iii. The update of the points-based license system and restrictions on access to certain PTW licenses reflect a large impact on the crash rate, with a rate of decrease equivalent to 22.72% for the period 2010 to 2013.

Main contributions of the Doctoral Thesis

In previous literature, road investments have been linked to both a reduction and an increase in road crash rates. Moreover, the lack of homogeneity when incorporating other variables into the models—socioeconomic, road network, traffic, and legislative variables—and the fact that the studies have been carried out for a specific country have greatly limited the ability to draw general conclusions. Therefore, the analysis carried out in this doctoral thesis presents a macro analysis at the international level for the first time with data from 23 countries, providing new and more robust evidence on the relationship between the economic resources allocated to roads and the number of crashes and deaths on them.

On the other hand, this is the first time in the literature that the influence of road investments on the road safety of a particularly vulnerable user group, namely motorcycles, has been analyzed. Likewise, a series of additional variables have been studied that had not been previously studied in PTWs crash models, together with the specific risk exposure for them and related to its traffic volume. Finally, it also validated the use of various configurations of negative binomial regression models with random parameters, which had not been studied in the context of PTWs with variables representing their risk exposure relative to traffic volume.

CAPÍTULO 7: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Capítulo 7:

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El estudio efectuado en la presente Tesis Doctoral ha contribuido a ampliar el conocimiento acerca de la influencia de los recursos económicos dedicados a las carreteras sobre la seguridad vial. Sin embargo, durante el desarrollo de este trabajo, y como consecuencia de las limitaciones encontradas, se han detectado algunas líneas de investigación que pueden aportar un mayor conocimiento al tema de estudio en el futuro. Por tanto, se proponen las siguientes líneas de investigación (L_i):

- L1. Utilizar una escala territorial inferior a la utilizada en los análisis europeos. Una escala plausible a estudiar para el conjunto de países de la UE sería la NUTS-2, ya que se disponen de datos de mortalidad suficientemente desagregados a dicha escala. Por otro lado, aunque la totalidad de las inversiones destinadas a carreteras sea difícil de cuantificar de manera homogénea para todas las regiones, sí se dispone de una regionalización del gasto efectuado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea (ESIF), dentro de los cuales, destaca el Fondo de Cohesión por su papel clave en el desarrollo de las redes transeuropeas de transporte. Por lo tanto, metodológicamente, se podría analizar bien mediante un enfoque de Diferencias en Diferencias (DID), como en Alves et al. (2021), o utilizando modelos de Regresión

Ponderada Geográficamente (GWR), como recientemente usaron para esta escala Wachnicka *et al.* (2021).

- L2. Investigar si la relación entre inversión en construcción de carreteras y la mortalidad vial sigue una curva tipo Kuznets, según el desarrollo económico de los países. Kuznets (1955) propuso que la relación entre la desigualdad de la renta y el desarrollo económico seguían una curva con forma de U invertida. En un sentido parecido, los resultados reflejados en el segundo caso de estudio, donde se clasifican los países según su desarrollo económico, muestran que: las inversiones en construcción carreteras se vinculan con un efecto beneficioso para la seguridad vial en los países con menor renta per cápita; mientras que, en los países con mayores rentas, las inversiones en construcción reflejan un efecto perjudicial. Estos resultados arrojan la cuestión de si hay un momento de desarrollo económico en el que se produce este cambio de influencia. Algunos autores ya han aplicado este mismo concepto a la seguridad vial, vinculando el incremento del desarrollo económico y la siniestralidad vial de acuerdo a una curva Kuznets: general para todo tipo de vehículos (Antoniou *et al.*, 2016; Law, 2015), aplicándola al caso de motocicletas (Law *et al.*, 2009), o utilizando un ratio motocicletas-turismos (Sirajudeen *et al.*, 2022). Por tanto, una futura investigación podría también aplicarlo al caso de la inversión en construcción de carreteras, y establecer, de esta forma, en qué punto del desarrollo económico de un país se produce el cambio de signo en la influencia que tienen las inversiones en construcción sobre la siniestralidad vial.
- L3. Profundizar en el enfoque metodológico empleado por Vålilä (2023), basado en un modelo de panel de vectores autorregresivos (VAR) bivalente, para explicar la relación entre ~~inversiones~~ en carreteras y seguridad vial. Si bien el autor hace hincapié en las limitaciones del análisis bivalente para describir un proceso complejo de generación de datos, como los indicadores de seguridad vial, también destaca su utilidad como fuente de información previa para los análisis multivariantes posteriores, tanto a largo como a corto plazo. En este sentido, el uso de una variable que represente las dinámicas del valor patrimonial del viario, en lugar de utilizar series temporales de inversión en construcción y gasto en mantenimiento de forma independiente, puede aportar nuevas evidencias sobre el impacto de las ~~inversiones~~ en la seguridad vial. En España, se podrían tomar los trabajos de Navareño *et al.* (2018a, 2018b) como referencia para la estimación del valor patrimonial de la red de carreteras.
- L4. Llevar a cabo estudios similares al desarrollado para motocicletas y ciclomotores, distinguiendo entre los tipos de carretera (autopista o carretera convencional). De esta forma se podrían identificar diferencias en los efectos de los recursos económicos invertidos según el tipo de vía. Para ello sería necesario disponer del volumen de V2RM que circula en cada tipo de carretera, datos que actualmente no están disponibles pero que podrían ser estimados, al menos de forma indirecta, utilizando por ejemplo el método de exposición cuasi-inducida (Haque *et al.*, 2012; Stamatiadis y Deacon, 1997). Por otro lado, hay que tener en cuenta que, la red

analizada en el presente estudio se corresponde con la RCE, ya que es la única de la que se ofrecen datos de tráfico específicos para V2RM. Esta red posee la mayor proporción de vías de gran capacidad respecto a otras carreteras convencionales y soporta más del 50% del tráfico total de vehículos (MITMA, 2020). Por lo tanto, teniendo en cuenta que entre el 65-84% de los fallecidos se producen en carreteras convencionales (DGT, 2020), y que las redes con mayor proporción de carreteras convencionales dependen de otras administraciones —regional, provincial y local—, el estudio de la seguridad vial de los V2RM en las redes de dichas administraciones podría aportar nuevas y más ajustadas evidencias.

- L5. Realizar un estudio sobre la severidad de los accidentes de los V2RM, el cual considere los posibles efectos de las inversiones en carreteras y la exposición al riesgo específica para este tipo de vehículos. Actualmente, la Estrategia de Seguridad Vial 2030 de España (DGT, 2022c) incluye el objetivo de reducción de los heridos graves en un 50% para 2030, junto con el de fallecidos, en sintonía con el contexto internacional (Council of the European Union, 2017; United Nations, 2020b). Por tanto, resulta necesario comprender no solo la influencia de potenciales factores —como las inversiones en carreteras— sobre la accidentabilidad sino también sobre la severidad de los heridos. No obstante, los estudios de severidad de V2RM suelen basarse en variables explicativas invariantes en el tiempo extraídas de las propias bases de datos de accidentes (Alnawmasi y Mannering, 2019; Chang *et al.*, 2019; Cunto y Ferreira, 2017; Jung *et al.*, 2013; Pai, 2009; Savolainen y Mannering, 2007; Schneider y Savolainen, 2011; Waseem *et al.*, 2019). Por otro lado, algunos autores han incorporado en sus modelos de severidad para todo tipo de vehículos, algunos factores explicativos que varían según tiempo y localización, como el tráfico (Saeed *et al.*, 2019) o el clima (Fountas *et al.*, 2018). Siguiendo esta línea, y aplicándolo al estudio de motocicletas, se podría investigar la distinta influencia que han ejercido los recursos invertidos en las carreteras sobre la severidad de los accidentes.
- L6. Aplicar el estudio en el ámbito de la siniestralidad vial urbana de España. El factor limitante que se ha encontrado durante el desarrollo de esta tesis para realizar un estudio en ámbito urbano ha sido la falta de datos relativos a la dotación de recursos económicos destinados al viario por las administraciones locales titulares de la vía. Sin embargo, tras la aprobación de la Ley 9/2017, de 8 de noviembre de Contratos del Sector Público, los órganos de contratación de las Administraciones locales, los perfiles de contratante de las entidades locales se encuentran centralizados en la Plataforma de Contratación del Sector Público (o en su defecto, en la establecida por la Comunidad Autónoma). Por otro lado, siguiendo la Ley de Transparencia²², el Ministerio de Hacienda difunde en abierto los datos sobre las licitaciones publicadas, por lo que se podrían extraer de aquí los recursos económicos destinados a cierta actividad —como el mantenimiento del viario— según la localidad de ejecución. Además, dado que se utiliza el código CPV (*Common Procurement Vocabulary*), también

²² Ley 19/2013, de 9 de diciembre, de transparencia, acceso a la información pública y buen gobierno.

Capítulo 7: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

existe una potencial aplicación sobre el nivel de desagregación de las actividades ejecutadas, aunque su uso no está todavía plenamente adoptado ni por la administración pública (Attström et al., 2012) ni por los licitadores (Celotti et al., 2021).

CAPÍTULO 8.

REFERENCIAS

Capítulo 8:

8. REFERENCIAS

- Abay, K.A., 2018. How Effective Are Non-Monetary Instruments for Safe Driving? Panel Data Evidence on the Effect of the Demerit Point System in Denmark. *Scand. J. Econ.* 120 3 , 894–924. doi:10.1111/sjoe.12235
- Abdul Manan, M.M., Jonsson, T., Várhelyi, A., 2013. Development of a safety performance function for motorcycle accident fatalities on Malaysian primary roads. *Saf. Sci.* 60, 13–20. doi:10.1016/j.ssci.2013.06.005
- Abellán Perpiñán, J.M., Cubí Mollá, P., Martínez Pérez, J.E., Méndez Martínez, I., Sánchez Martínez, F.I., Herrero Blanco, C., 2011. *Siniestralidad vial en España y la Unión Europea (1997-2007)*, 1a ed. Fundación BBVA, Bilbao.
- Adame García, V., Meseguer, J.A., Ortiz, L.P., Tuesta, D., 2017. Infrastructure and economic growth from a meta-analysis approach: do all roads lead to Rome? *BBVA Res.* April .
- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), 2022. Datos climatológicos [WWW Document]. Ser. histórica 2007-2015. URL <https://www.aemet.es/> (accessed 6.17.22).
- Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Automat. Contr.* 19 6 , 716–723. doi:10.1109/TAC.1974.1100705

Capítulo 8: REFERENCIAS

- Albalade, D., 2008. Lowering blood alcohol content levels to save lives: The European experience. *J. Policy Anal. Manag.* 27 1 , 20–39. doi:10.1002/pam.20305
- Albalade, D., Bel-Piñana, P., 2019. The effects of public private partnerships on road safety outcomes. *Accid. Anal. Prev.* 128 December 2017 , 53–64. doi:10.1016/j.aap.2019.03.015
- Albalade, D., Bel, G., 2012. Motorways, tolls and road safety: Evidence from Europe. *SERIEs* 3 4 , 457–473. doi:10.1007/s13209-011-0071-6
- Albalade, D., Fernández, L., Yarygina, A., 2013. The road against fatalities: Infrastructure spending vs. regulation? *Accid. Anal. Prev.* 59, 227–239. doi:10.1016/j.aap.2013.06.008
- Ali, Q., Yaseen, M.R., Khan, M.T.I., 2019a. Road traffic fatalities and its determinants in high-income countries: a continent-wise comparison. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26 19 , 19915–19929. doi:10.1007/s11356-019-05410-9
- Ali, Q., Yaseen, M.R., Khan, M.T.I., 2019b. The causality of road traffic fatalities with its determinants in upper middle income countries: A continent-wide comparison. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 119 December 2018 , 301–312. doi:10.1016/j.tra.2018.12.002
- Allen, T., Newstead, S., Lenné, M.G., McClure, R., Hillard, P., Symmons, M., Day, L., 2017. Contributing factors to motorcycle injury crashes in Victoria, Australia. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 45, 157–168. doi:10.1016/j.trf.2016.11.003
- Alnawmasi, N., Mannering, F., 2019. A statistical assessment of temporal instability in the factors determining motorcyclist injury severities. *Anal. Methods Accid. Res.* 22, 100090. doi:10.1016/j.amar.2019.100090
- Alves, P.J., Emanuel, L., Pereira, R.H.M., 2021. Highway concessions and road safety: Evidence from Brazil. *Res. Transp. Econ.* 90 July , 101118. doi:10.1016/j.retrec.2021.101118
- Anastasopoulos, P.C., Mannering, F.L., 2009. A note on modeling vehicle accident frequencies with random-parameters count models. *Accid. Anal. Prev.* 41 1 , 153–159. doi:10.1016/j.aap.2008.10.005
- Antoniou, C., Yannis, G., Papadimitriou, E., Lassarre, S., 2016. Relating traffic fatalities to GDP in Europe on the long term. *Accid. Anal. Prev.* 92, 89–96. doi:10.1016/j.aap.2016.03.025
- Aparicio Izquierdo, F., Arenas Ramírez, B., Bernardos Rodríguez, E., 2013. The interurban DRAG-Spain model: The main factors of influence on road accidents in Spain. *Res. Transp. Econ.* 37 1 , 57–65. doi:10.1016/j.retrec.2011.08.011
- Asociación Española de la Carretera (AEC), 2020. Resultados del Informe sobre Necesidades de Inversión en Conservación de las Carreteras Españolas 2019-2020. *Carreteras* 229 , 66–70.
- Attström, K., Kröber, R., Jähne, J.C., Bergschneider, J., Thomä, J., Swysen, T., Sholzen, F.-S., Trautenmüller, T., 2012. Review of the Functioning of the Cpv Codes / System: Final report. Brussels, Belgium.
- Bailey, D., Katz, J.N., 2011. Implementing Panel-Corrected Standard Errors in R: The pcse Package. *J. Stat. Softw.* 42 June . doi:10.18637/jss.v042.c01

- Baltagi, B.H., 2005. *Econometric Analysis of Panel Data* 3rd ed., 3er ed. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, United Kingdom.
- Banco de España, 2017. Informe sobre la crisis financiera y bancaria en España, 2008-2014. Madrid.
- Beck, L.F., Dellinger, A.M., O'Neil, M.E., 2007. Motor Vehicle Crash Injury Rates by Mode of Travel, United States: Using Exposure-Based Methods to Quantify Differences. *Am. J. Epidemiol.* 166 2 , 212–218. doi:10.1093/aje/kwm064
- Beck, N., Katz, J.N., 1995. What To Do (and Not to Do) with Time-Series Cross-Section Data. *Am. Polit. Sci. Rev.* 89 3 , 634–647. doi:10.2307/2082979
- Bell, D.N.F., Blanchflower, D.G., 2011. Young people and the Great Recession. *Oxford Rev. Econ. Policy* 27 2 , 241–267. doi:10.1093/oxrep/grr011
- Bergel-Hayat, R., Debbarh, M., Antoniou, C., Yannis, G., 2013. Explaining the road accident risk: Weather effects. *Accid. Anal. Prev.* 60, 456–465. doi:10.1016/j.aap.2013.03.006
- Bishai, D., Quresh, A., James, P., Ghaffar, A., 2006. National road casualties and economic development. *Health Econ.* 15 1 , 65–81. doi:10.1002/hec.1020
- Bjørnskau, T., Nævestad, T.-O., Akhtar, J., 2012. Traffic safety among motorcyclists in Norway: A study of subgroups and risk factors. *Accid. Anal. Prev.* 49, 50–57. doi:10.1016/j.aap.2011.09.051
- Blaizot, S., Papon, F., Haddak, M.M., Amoros, E., 2013. Injury incidence rates of cyclists compared to pedestrians, car occupants and powered two-wheeler riders, using a medical registry and mobility data, Rhône County, France. *Accid. Anal. Prev.* 58, 35–45. doi:10.1016/j.aap.2013.04.018
- Bliss, T., Breen, J., 2009. *Country Guidelines for the Conduct of Road Safety Management Capacity REviews and Specification of Lead Agency Reforms, Investment Strategies Reforms, Investment Strategies and Safe System Projects*, The World Bank Global Road Safety Facility. Washington DC.
- Bouaoun, L., Haddak, M.M., Amoros, E., 2015. Road crash fatality rates in France: A comparison of road user types, taking account of travel practices. *Accid. Anal. Prev.* 75, 217–225. doi:10.1016/j.aap.2014.10.025
- Branas, C.C., Knudson, M.M., 2001. Helmet laws and motorcycle rider death rates. *Accid. Anal. Prev.* 33 5 , 641–648. doi:10.1016/S0001-4575(00)00078-6
- Breitung, J., Das, S., 2005. Panel unit root tests under cross-sectional dependence. *Stat. Neerl.* 59 4 , 414–433. doi:10.1111/j.1467-9574.2005.00299.x
- Brown, L., Morris, A., Thomas, P., Ekambaram, K., Margaritis, D., Davidse, R., Usami, D.S., Robibaro, M., Persia, L., Buttler, I., Ziakopoulos, A., Theofilatos, A., Yannis, G., Martin, A., Wadji, F., 2021. Investigation of accidents involving powered two wheelers and bicycles – A European in-depth study. *J. Safety Res.* 76, 135–145. doi:10.1016/j.jsr.2020.12.015
- Brzozowska-Rup, K., Nowakowska, M., 2020. Modelling road traffic safety indices by means of regression with panel data. *Eng. Manag. Prod. Serv.* 12 4 , 40–51. doi:10.2478/emj-2020-0026

Capítulo 8: REFERENCIAS

- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018. Verkehr in Zahlen 2018/2019, in: Verkehrsdynamik. Flensburg, Germany.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2004. Verkehr in Zahlen 2003/2004. Hamburg, Germany.
- Cafiso, S., D'Agostino, C., Persaud, B., 2017. Investigating the influence on safety of retrofitting Italian motorways with barriers meeting a new EU standard. *Traffic Inj. Prev.* 18 3 , 324–329. doi:10.1080/15389588.2016.1203424
- Caliendo, C., De Guglielmo, M.L., Russo, I., 2019. Analysis of crash frequency in motorway tunnels based on a correlated random-parameters approach. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 85 December 2018 , 243–251. doi:10.1016/j.tust.2018.12.012
- Castillo-Manzano, J.I., Castro-Nuño, M., 2012. Driving licenses based on points systems: Efficient road safety strategy or latest fashion in global transport policy? A worldwide meta-analysis. *Transp. Policy* 21, 191–201. doi:10.1016/j.tranpol.2012.02.003
- Castillo-Manzano, J.I., Castro-Nuño, M., Fageda, X., 2021. Analyzing the safety impact of longer and heavier vehicles circulating in the European market. *J. Safety Res.* xxxx . doi:10.1016/j.jsr.2021.01.001
- Castillo-Manzano, J.I., Castro-Nuño, M., Fageda, X., 2015. Can cars and trucks coexist peacefully on highways? Analyzing the effectiveness of road safety policies in Europe. *Accid. Anal. Prev.* 77, 120–126. doi:10.1016/j.aap.2015.01.010
- Castillo-Manzano, J.I., Castro-Nuño, M., Fageda, X., 2014. Can health public expenditure reduce the tragic consequences of road traffic accidents? The EU-27 experience. *Eur. J. Heal. Econ.* 15 6 , 645–652. doi:10.1007/s10198-013-0512-1
- Castillo-Manzano, J.I., Castro-Nuño, M., Fageda, X., López-Valpuesta, L., 2017. An assessment of the effects of alcohol consumption and prevention policies on traffic fatality rates in the enlarged EU. Time for zero alcohol tolerance? *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 50, 38–49. doi:10.1016/j.trf.2017.06.017
- Castillo-Manzano, J.I., Castro-Nuño, M., López-Valpuesta, L., Boby, J., 2020. Looking for traces of the Troika's intervention in European road safety. *Accid. Anal. Prev.* 137 February , 105461. doi:10.1016/j.aap.2020.105461
- Celotti, P., Alessandrini, M., Valenza, A., Amichetti, C., Fábregas, J., 2021. SME needs analysis in public procurement: Final report. Publications Office of the European Union. doi:10.2873/86199
- Chang, F., Xu, P., Zhou, H., Chan, A.H.S., Huang, H., 2019. Investigating injury severities of motorcycle riders: A two-step method integrating latent class cluster analysis and random parameters logit model. *Accid. Anal. Prev.* 131 January , 316–326. doi:10.1016/j.aap.2019.07.012
- Chen, E., Tarko, A.P., 2014. Modeling safety of highway work zones with random parameters and random effects models. *Anal. Methods Accid. Res.* 1, 86–95. doi:10.1016/j.amar.2013.10.003
- Chen, S., Saeed, T.U., Labi, S., 2017. Impact of road-surface condition on rural highway safety: A multivariate random parameters negative binomial approach. *Anal. Methods Accid. Res.* 16, 75–89. doi:10.1016/j.amar.2017.09.001

- Chen, S., Zhang, S., Xing, Y., Lu, J., Peng, Y., Zhang, H.M., 2020. The Impact of Truck Proportion on Traffic Safety Using Surrogate Safety Measures in China. *J. Adv. Transp.* 2020, 1–15. doi:10.1155/2020/8636417
- Claros, B., Schroeder, E., Brummett, K., Chitturi, M., Bill, A., Noyce, D.A., 2022. Safety and Economic Evaluation of the Highway Safety Improvement Program: Is there a Return on Investment? *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 036119812110699. doi:10.1177/03611981211069947
- Cochrane, D., Orcutt, G.H., 1949. Application of Least Squares Regression to Relationships Containing Auto- Correlated Error Terms. *J. Am. Stat. Assoc.* 44 245 , 32–61. doi:10.2307/2280349
- Comisión Europea, 2010. Hacia un espacio europeo de seguridad vial: orientaciones políticas sobre seguridad vial 2011-2020. COM(2010) 389 final. Bruselas.
- Comisión Europea, 2003. Programa de acción europeo de seguridad vial. Reducir a la mitad el número de víctimas de accidentes de tráfico en la Unión Europea de aquí a 2010: una responsabilidad compartida. COM(2003) 311 final. Bruselas.
- Comisión Europea, 2002. Libro Blanco “La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad.” Oficina de publicaciones oficiales de las comunidades europeas, Luxemburgo.
- Coruh, E., Bilgic, A., Tortum, A., 2015. Accident analysis with the random parameters negative binomial panel count data model. *Anal. Methods Accid. Res.* 7, 37–49. doi:10.1016/j.amar.2015.07.001
- Council of the European Union, 2017. Valletta Declaration on Road Safety. Valletta, Malta.
- Cunto, F.J.C., Ferreira, S., 2017. An analysis of the injury severity of motorcycle crashes in Brazil using mixed ordered response models. *J. Transp. Saf. Secur.* 9 May , 33–46. doi:10.1080/19439962.2016.1162891
- Daniello, A., Gabler, H.C., 2011. Fatality risk in motorcycle collisions with roadside objects in the United States. *Accid. Anal. Prev.* 43 3 , 1167–1170. doi:10.1016/j.aap.2010.12.027
- Das, S., Maurya, A.K., 2017. Modelling of motorised two-wheelers: a review of the literature. *Transp. Rev.* 38 2 , 209–231. doi:10.1080/01441647.2017.1317049
- de Lapparent, M., 2006. Empirical Bayesian analysis of accident severity for motorcyclists in large French urban areas. *Accid. Anal. Prev.* 38 2 , 260–268. doi:10.1016/j.aap.2005.09.001
- De Paola, M., Scoppa, V., Falcone, M., 2013. The deterrent effects of the penalty points system for driving offences: a regression discontinuity approach. *Empir. Econ.* 45 2 , 965–985. doi:10.1007/s00181-012-0642-9
- de Rome, L., Fitzharris, M., Baldock, M., Fernandes, R., Ma, A., Brown, J., 2016. The prevalence of crash risk factors in a population-based study of motorcycle riders. *Injury* 47 9 , 2025–2033. doi:10.1016/j.injury.2016.03.033
- Delhay, A., Marot, L., 2015. RIDERSCAN: European Scanning Tour for Motorcycle Safety. Federation of European Motorcyclists' Associations, Brussels, Belgium.

Capítulo 8: REFERENCIAS

- Dietrich, H., Möller, J., 2016. Youth unemployment in Europe – business cycle and institutional effects. *Int. Econ. Econ. Policy* 13 1, 5–25. doi:10.1007/s10368-015-0331-1
- Dirección General de Tráfico, 2005. Plan Estratégico de Seguridad Vial 2005-2008. Madrid.
- Dirección General de Tráfico (DGT), 2020. Informe sobre la siniestralidad de motocicletas en 2019. Observatorio Nacional de Seguridad Vial.
- Dirección General de Tráfico (DGT), 2019. Plan de medidas especiales para la seguridad vial de motocicletas y ciclomotores 2019-2020. Observatorio Nacional de Seguridad Vial, Madrid, Spain.
- Dirección General de Tráfico (DGT), 2007. Plan estratégico para la seguridad vial de motocicletas y ciclomotores. Resumen ejecutivo. Observatorio Nacional de Seguridad Vial, Madrid, Spain.
- Dirección General de Tráfico (DGT), 2022a. Las principales cifras de la Siniestralidad Vial España 2020. Madrid.
- Dirección General de Tráfico (DGT), 2022b. Microdatos de accidentes [WWW Document]. URL https://sedeapl.dgt.gob.es/WEB_IEST_CONSULTA/ (accessed 6.17.22).
- Dirección General de Tráfico (DGT), 2022c. Estrategia de Seguridad Vial 2030. Madrid.
- Dirección General de Tráfico (DGT), 2011. Estrategia de Seguridad Vial 2011-2020. Madrid.
- Driscoll, J.C., Kraay, A.C., 1998. Consistent covariance matrix estimation with spatially dependent panel data. *Rev. Econ. Stat.* 80 4, 549–559. doi:10.1162/003465398557825
- Dubois, S., Antoniazzi, D., Klein, R., Bédard, M., 2020. Age and engine displacement are associated with unsafe motorcycle rider actions. *J. Safety Res.* 74, 119–124. doi:10.1016/j.jsr.2020.04.004
- Economou, A., Nikolaou, A., Theodossiou, I., 2008. Are recessions harmful to health after all? *J. Econ. Stud.* 35 5, 368–384. doi:10.1108/01443580810903536
- Eisenberg, D., 2004. The mixed effects of precipitation on traffic crashes. *Accid. Anal. Prev.* 36 4, 637–647. doi:10.1016/S0001-4575(03)00085-X
- Elvik, R., 2021. Democracy, governance, and road safety. *Accid. Anal. Prev.* 154 March, 106067. doi:10.1016/j.aap.2021.106067
- Elvik, R., 2015. An analysis of the relationship between economic performance and the development of road safety. *ITF/IRTAD, Why Does Road Saf. Improv. When Econ. Times Are Hard?* 43–142.
- Elvik, R., 2010. Why some road safety problems are more difficult to solve than others. *Accid. Anal. Prev.* 42 4, 1089–1096. doi:10.1016/j.aap.2009.12.020
- Elvik, R., 2000. How much do road accidents cost the national economy? *Accid. Anal. Prev.* 32 6, 849–851. doi:10.1016/S0001-4575(00)00015-4
- Elvik, R., Høye, A., Vaa, T., Sørensen, M., 2009. *The Handbook of Road Safety Measures*, Second. ed, *The Handbook of Road Safety Measures*. Emerald Group Publishing Limited. doi:10.1108/9781848552517

- Elvik, R., Vaa, T., 2009. The handbook of road safety measures - Part II general Propouse, policy instruments, in: Elsevier. pp. 148–256.
- Estradas de Portugal S.A., 2013. Relatório e Contas 2012. Lisboa, Portugal.
- Estradas de Portugal S.A., 2012. Relatório e Contas 2011. Almada, Portugal.
- Estradas de Portugal S.A., 2011. Relatório e Contas 2010. Lisboa, Portugal.
- European Association of Motorcycle Manufacturers (ACEM), 2009. MAIDS: In-depth investigations of accidents involving powered two wheelers. Brussels, Belgium.
- European Commission. Directorate General for Mobility and Transport, 2019. Handbook on the external costs of transport: Version 2019. Publications Office of the European Union. doi:10.2832/27212
- European Commission. Directorate General for Transport, 2017. Traffic Safety Basic Facts 2017. Motorways.
- European Commission. Directorate General for Transport, 2015. Alcohol 2015. European Commission. Directorate General for Transport.
- European Commission, 2022. EU transport in figures - Statistical pocketbook 2022, Notes. Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi:10.2832/928929
- European Commission, 2020. EU road safety policy framework 2021-2030 - Next steps towards ‘ Vision Zero .’ Publications Office of the European Union, Luxembourg, Luxembourg. doi:10.2832/261629
- European Commission, 2019. Overview of transport infrastructure expenditures and costs. Publications Office of the European Union. doi:10.2832/853267
- European Commission, 2018. Disscusion Paper - “State of infrastructure maintenance.” Brussels, Belgium.
- European Court of Auditors, 2013. Are EU Cohesion Policy funds well spent on roads? Special Report No 5/2013. Publications Office of the European Union, Luxembourg, Luxembourg.
- European Investment Bank, 2018. From Recovery To Sustainable Growth.
- European Investment Bank, 2016. Restoring EU competitiveness 2016 updated version. Luxembourg.
- European Parliament: DG for Internal Policies, 2014. EU Road Surfaces: Economic and safety impact of the lack of regular road maintenance. Brussels, Belgium.
- European Parliament, 2021. Report on the EU Road Safety Policy Framework 2021-2030 – Recommendations on next steps towards ‘Vision Zero’ (2021/2014(INI)).
- European Transport Safety Council, 2011. 5th Road Safety PIN Report. Brussels, Belgium.
- European Transport Safety Council (ETSC), 2021. RANKING EU PROGRESS 15th Road Safety Performance Index Report. Brussels, Belgium.
- European Transport Safety Council (ETSC), 2019. Ranking EU Progress. 13 th Road Safety

Capítulo 8: REFERENCIAS

- Performance Index Report. Brussels, Belgium.
- Eurostat, 2022. Persons killed in road accidents by age (source: CARE) [WWW Document]. URL <https://ec.europa.eu/eurostat/> (accessed 6.28.22).
- Eustace, D., Indupuru, V.K., Hovey, P., 2011. Identification of Risk Factors Associated with Motorcycle-Related Fatalities in Ohio. *J. Transp. Eng.* 137 7 , 474–480. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000229
- Farchi, S., Molino, N., Rossi, P.G., Borgia, P., Krzyzanowski, M., Dalbokova, D., Kim, R., 2006. Defining a common set of indicators to monitor road accidents in the European Union. *BMC Public Health* 6, 1–12. doi:10.1186/1471-2458-6-183
- Flask, T., Schneider, W.H., Lord, D., 2014. A segment level analysis of multi-vehicle motorcycle crashes in Ohio using Bayesian multi-level mixed effects models. *Saf. Sci.* 66, 47–53. doi:10.1016/j.ssci.2013.12.006
- Foster, V., Gorgulu, N., Jain, D., Straub, S., Vagliasindi, M., 2023. The Impact of Infrastructure on Development Outcomes: A Meta-Analysis. *World Bank Gr. Infrastruct. Chief Econ. Off.* March .
- Fountas, G., Anastasopoulos, P.C., Abdel-Aty, M., 2018. Analysis of accident injury-severities using a correlated random parameters ordered probit approach with time variant covariates. *Anal. Methods Accid. Res.* 18, 57–68. doi:10.1016/j.amar.2018.04.003
- French, M.T., Gumus, G., 2014. Macroeconomic fluctuations and motorcycle fatalities in the U.S. *Soc. Sci. Med.* 104, 187–193. doi:10.1016/j.socscimed.2013.12.019
- Fridstrøm, L., 1999. An econometric model of car ownership , road use , accidents and their severity, Econometric models of road use, accidents , and road investment decisions. Institute of transport economics.
- Fridstrøm, L., Ifver, J., Ingebrigtsen, S., Kulmala, R., Thomsen, L.K., 1995. Measuring the contribution of randomness, exposure, weather, and daylight to the variation in road accident counts. *Accid. Anal. Prev.* 27 1 , 1–20. doi:10.1016/0001-4575(94)E0023-E
- Fridstrøm, L., Ingebrigtsen, S., 1991. An aggregate accident model based on pooled, regional time-series data. *Accid. Anal. Prev.* 23 5 , 363–378. doi:10.1016/0001-4575(91)90057-C
- Fundación MAPFRE, 2021. Hoja de ruta para la mejora de la seguridad vial de usuarios de motocicletas y ciclomotores. Fundación MAPFRE, Madrid, Spain.
- Gabauer, D.J., Li, X., 2015. Influence of horizontally curved roadway section characteristics on motorcycle-to-barrier crash frequency. *Accid. Anal. Prev.* 77, 105–112. doi:10.1016/j.aap.2015.02.006
- Ganelli, G., Tervala, J., 2016. The Welfare Multiplier of Public Infrastructure Investment. *IMF Work. Pap.* 16 40 , 1. doi:10.5089/9781475516678.001
- Gaudry, M., 1984. Drag, un Modele de la Demande Routiere, des Accidents et de Leur Gravite, Applique au Quebec de 1956 a 1982, Cahiers de recherche. Universite de Montreal, Departement de sciences economiques.

- Gaygisiz, E., 2009. Economic and Cultural Correlates of Road-Traffic Accident Fatality Rates in OECD Countries. *Percept. Mot. Skills* 109 2 , 531–545. doi:10.2466/pms.109.2.531-545
- GBD 2017 Causes of Death Collaborators, 2018. Global, regional, and national age-sex-specific mortality for 282 causes of death in 195 countries and territories, 1980–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet* 392 10159 , 1736–1788. doi:10.1016/S0140-6736(18)32203-7
- Geedipally, S.R., Turner, P.A., Patil, S., 2011. Analysis of motorcycle crashes in Texas with multinomial logit model. *Transp. Res. Rec.* 2265 , 62–69. doi:10.3141/2265-07
- Gerdtham, U.-G., Ruhm, C.J., 2006. Deaths rise in good economic times: Evidence from the OECD. *Econ. Hum. Biol.* 4 3 , 298–316. doi:10.1016/j.ehb.2006.04.001
- Gershon, P., Ben-Asher, N., Shinar, D., 2012. Attention and search conspicuity of motorcycles as a function of their visual context. *Accid. Anal. Prev.* 44 1 , 97–103. doi:10.1016/j.aap.2010.12.015
- Gershon, P., Shinar, D., 2013. Increasing motorcycles attention and search conspicuity by using Alternating-Blinking Lights System (ABLS). *Accid. Anal. Prev.* 50, 801–810. doi:10.1016/j.aap.2012.07.005
- Government of Spain, 2007. Organic Law 15/2007, Official State Gazette, 1 December, num. 288.
- Greene, W., 2008. Functional forms for the negative binomial model for count data. *Econ. Lett.* 99 3 , 585–590. doi:10.1016/j.econlet.2007.10.015
- Greene, W.H., 2016. LIMDEP Version 11. Econometric Software, Inc., New York, USA.
- Greene, W.H., 2012. *Econometric Analysis*, 7th. Inter. ed. Pearson Education Limited, Harlow, United Kingdom.
- Greene, W.H., 2003. *Econometric Analysis* 5th Ed. Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Gujarati, D.N., 2003. *Basic Econometrics*, 4th Editio. ed. McGraw-Hill/Irwin, New York, USA.
- Guria, J., 1999. An economic evaluation of incremental resources to road safety programmes in New Zealand. *Accid. Anal. Prev.* 31 1–2 , 91–99. doi:10.1016/s0001-4575(98)00050-5
- Haddon, W., 1968. The changing approach to the epidemiology, prevention, and amelioration of trauma: the transition to approaches etiologically rather than descriptively based. *Am. J. Public Heal. Nations Heal.* 58 8 , 1431–1438. doi:10.2105/AJPH.58.8.1431
- Hakim, S., Shefer, D., Hakkert, A.S., Hocherman, I., 1991. A critical review of macro models for road accidents. *Accid. Anal. Prev.* 23 5 , 379–400. doi:10.1016/0001-4575(91)90058-D
- Hakkert, S., Braimaister, L., 2002. *The uses of exposure and risk in road safety studies*, SWOV Institute for Road Safety Research. Leidschendam.
- Haque, M.M., Chin, H.C., Debnath, A.K., 2012. *An investigation on multi-vehicle*

- motorcycle crashes using log-linear models. *Saf. Sci.* 50 2 , 352–362. doi:10.1016/j.ssci.2011.09.015
- Harnen, S., Wong, S.V., Umar, R.S.R., Wan Hashim, W.I., 2003. Motorcycle crash prediction model for non-signalized intersections. *IATSS Res.* 27 2 , 58–65. doi:10.1016/S0386-1112(14)60144-8
- Harrison, W.A., Christie, R., 2005. Exposure survey of motorcyclists in New South Wales. *Accid. Anal. Prev.* 37 3 , 441–451. doi:10.1016/j.aap.2004.12.005
- Hasselberg, M., Vaez, M., Lucie Laflamme, 2005. Socioeconomic aspects of the circumstances and consequences of car crashes among young adults. *Soc. Sci. Med.* 60 2 , 287–295. doi:10.1016/j.socscimed.2004.05.006
- He, M.M., 2016. Driving through the Great Recession: Why does motor vehicle fatality decrease when the economy slows down? *Soc. Sci. Med.* 155, 1–11. doi:10.1016/j.socscimed.2016.02.016
- Hefny, A.F., Barss, P., Eid, H.O., Abu-Zidan, F.M., 2012. Motorcycle-related injuries in the United Arab Emirates. *Accid. Anal. Prev.* 49, 245–248. doi:10.1016/j.aap.2011.05.003
- Hilbe, J.M., 2011. Negative Binomial Regression, 2nd ed. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511973420
- Hoechle, D., 2007. Robust Standard Errors for Panel Regressions with Cross-Sectional Dependence. *Stata J. Promot. Commun. Stat.* Stata 7 3 , 281–312. doi:10.1177/1536867X0700700301
- Hou, Q., Huo, X., Tarko, A.P., Leng, J., 2021. Comparative analysis of alternative random parameters count data models in highway safety. *Anal. Methods Accid. Res.* 30, 100158. doi:10.1016/j.amar.2021.100158
- Hou, Q., Tarko, A.P., Meng, X., 2018. Investigating factors of crash frequency with random effects and random parameters models: New insights from Chinese freeway study. *Accid. Anal. Prev.* 120 January 2018 , 1–12. doi:10.1016/j.aap.2018.07.010
- Houston, D.J., Lillard E. Richardson, J., Neeley, G.W., 1995. Legislating Traffic Safety: A Pooled Time Series Analysis. *Soc. Sci. Q.* 76 2 , 328–345.
- Houston, D.J., Richardson, L.E., 2008. Motorcyclist fatality rates and mandatory helmet-use laws. *Accid. Anal. Prev.* 40 1 , 200–208. doi:10.1016/j.aap.2007.05.005
- Hyatt, E., Griffin, R., Rue, L.W., McGwin, G., 2009. The association between price of regular-grade gasoline and injury and mortality rates among occupants involved in motorcycle- and automobile-related motor vehicle collisions. *Accid. Anal. Prev.* 41 5 , 1075–1079. doi:10.1016/j.aap.2009.06.009
- Infraestruturas de Portugal S.A., 2019. Relatório e Contas 2018. Almada, Portugal.
- Infraestruturas de Portugal S.A., 2016. Relatório e Contas 2015. Pragal, Portugal.
- Instituto Nacional de Estadística (INE), 2021. Índices de Precios de Consumo Armonizado. Base 2015. Medias anuales [WWW Document]. Ser. histórica 1997-2020. URL <https://www.ine.es/> (accessed 6.16.22).
- Instituto Nacional de Estadística (INE), 2019a. Contabilidad Regional de España - Revisión

- 2019 [WWW Document]. Ser. histórica 2000-2017. URL <https://www.ine.es/index.htm> (accessed 6.16.22).
- Instituto Nacional de Estadística (INE), 2019b. Indicadores de Estructura de la Población [WWW Document]. Ser. histórica 1996-2018. URL <https://www.ine.es/index.htm> (accessed 6.16.22).
- Instituto Nacional de Estadística (INE), 2016. Encuesta de Población Activa [WWW Document]. Ser. histórica 2007-2015. URL <https://www.ine.es/index.htm> (accessed 6.16.22).
- Instituto Nacional de Estatística, 2002. Estatísticas dos transportes e comunicações 2000. Instituto Nacional de Estatística, Lisbon, Portugal.
- ITF, 2021. Road Safety Annual Report 2021: The impact of Covid-19. Paris.
- ITF, 2016. Zero Road Deaths and Serious Injuries: Leading a Paradigm Shift to a Safe System. OECD Publishing, Paris, France. doi:10.1787/9789282108055-en
- Izquierdo, F.A., Ramírez, B.A., McWilliams, J.M.M., Ayuso, J.P., 2011. The endurance of the effects of the penalty point system in Spain three years after. Main influencing factors. *Accid. Anal. Prev.* 43 3 , 911–922. doi:10.1016/j.aap.2010.11.014
- Jung, S., Xiao, Q., Yoon, Y., 2013. Evaluation of motorcycle safety strategies using the severity of injuries. *Accid. Anal. Prev.* 59, 357–364. doi:10.1016/j.aap.2013.06.030
- Keall, M.D., Newstead, S., 2012. Analysis of factors that increase motorcycle rider risk compared to car driver risk. *Accid. Anal. Prev.* 49, 23–29. doi:10.1016/j.aap.2011.07.001
- Keep, M., Rutherford, T., 2011. Reported road accident statistics. London House Commons Libr. October , 1–16.
- Kopits, E., Cropper, M., 2005. Traffic fatalities and economic growth. *Accid. Anal. Prev.* doi:10.1016/j.aap.2004.04.006
- Kopits, E., Cropper, M.L., 2008. Why Have Traffic Fatalities Declined in Industrialized Countries? Implications for Pedestrians and Vehicle Occupants. *SSRN Electron. J.* 42 1 , 129–154. doi:10.2139/ssrn.780505
- Kuznets, S., 1955. Economic Growth and Income Inequality. *Am. Econ. Rev.* 45 1 , 1–28.
- Kweon, Y.J., Kockelman, K.M., 2003. Overall injury risk to different drivers: Combining exposure, frequency, and severity models. *Accid. Anal. Prev.* 35 4 , 441–450. doi:10.1016/S0001-4575(02)00021-0
- Labi, S., 2011. Efficacies of roadway safety improvements across functional subclasses of rural two-lane highways. *J. Safety Res.* 42 4 , 231–239. doi:10.1016/j.jsr.2011.01.008
- Law, T.H., 2015. Factors associated with the relationship between non-fatal road injuries and economic growth. *Transp. Policy* 42, 166–172. doi:10.1016/j.tranpol.2015.06.004
- Law, T.H., Noland, R.B., Evans, A.W., 2013. Factors associated with the enactment of safety belt and motorcycle helmet laws. *Risk Anal.* 33 7 , 1367–1378. doi:10.1111/j.1539-6924.2012.01916.x

Capítulo 8: REFERENCIAS

- Law, T.H., Noland, R.B., Evans, A.W., 2009. Factors associated with the relationship between motorcycle deaths and economic growth. *Accid. Anal. Prev.* 41 2 , 234–240. doi:10.1016/j.aap.2008.11.005
- Lee, J., Park, B.-J., Lee, C., 2018. Deterrent effects of demerit points and license sanctions on drivers' traffic law violations using a proportional hazard model. *Accid. Anal. Prev.* 113 August 2017 , 279–286. doi:10.1016/j.aap.2018.01.028
- Legrand, S.A., Isalberti, C., der Linden, T. Van, Bernhoft, I.M., Hels, T., Simonsen, K.W., Favretto, D., Ferrara, S.D., Caplinskiene, M., Minkuviene, Z., Pauliukevicius, A., Houwing, S., Mathijssen, R., Lillsunde, P., Langel, K., Blencowe, T., Verstraete, A.G., 2013. Alcohol and drugs in seriously injured drivers in six European countries. *Drug Test. Anal.* 5 3 , 156–165. doi:10.1002/dta.1393
- Levene, H., 1960. Robust tests for equality of variances. *Contrib. to Probab. Stat. Essays Honor Harold Hotell.* 278–292.
- Li, M.-D., Doong, J.-L., Huang, W.-S., Lai, C.-H., Jeng, M.-C., 2009. Survival hazards of road environment factors between motor-vehicles and motorcycles. *Accid. Anal. Prev.* 41 5 , 938–947. doi:10.1016/j.aap.2009.05.009
- Licaj, I., Haddak, M., Pochet, P., Chiron, M., 2011. Contextual deprivation, daily travel and road traffic injuries among the young in the Rhône Département (France). *Accid. Anal. Prev.* 43 5 , 1617–1623. doi:10.1016/j.aap.2011.02.003
- Long, J.S., 1997. *Regression Models for Categorical and Limited Dependent Variables.* SAGE, Thousand Oaks, CA.
- Lv, J., Lord, D., Zhang, Y., Chen, Z., 2015. Investigating Peltzman effects in adopting mandatory seat belt laws in the US: Evidence from non-occupant fatalities. *Transp. Policy* 44, 58–64. doi:10.1016/j.tranpol.2015.06.012
- McCartt, A.T., Blunar, L., Teoh, E.R., Strouse, L.M., 2011. Overview of motorcycling in the United States: A national telephone survey. *J. Safety Res.* 42 3 , 177–184. doi:10.1016/j.jsr.2011.05.003
- Medlock, K.B., Soligo, R., 2002. Car ownership and economic development with forecasts to the year 2015. *J. Transp. Econ. Policy* 36 2 , 163–188.
- Ministère de l'Équipement, du T. et de la M., 2005. *Mémento de statistiques des transports 2003.* Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2015. *Rijksjaarverslag 2014 a Infrastructuurfonds.* The Hague, Netherlands.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2019. *Rijksjaarverslag 2018 a Infrastructuurfonds.* The Hague, Netherlands.
- Ministério da Economia e Transição Digital, 2019. *Base de Dados de Infraestruturas - GEE [WWW Document].* URL <https://www.gee.gov.pt/pt/publicacoes/indicadores-e-estatisticas/base-de-dados-de-infraestruturas> (accessed 4.29.21).
- Ministerio de Fomento. Dirección General de Programación Económica y Presupuestos. Subdirección General de Estudios Económicos y Estadísticas, 2016. *Anuario Estadístico 2015, Anuario estadístico.* Centro de Publicaciones. Secretaría General

- Técnica. Ministerio de Fomento, Madrid, Spain.
- Ministerio de Fomento. Dirección General de Programación Económica y Presupuestos. Subdirección General de Estudios Económicos y Estadísticas, n.d. Serie: Anuario estadístico, NIPO 161-13-171-0. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento, Madrid, Spain.
- Ministerio de Fomento, n.d. El tráfico en las autopistas de peaje. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento, Madrid, Spain.
- Ministerio de Hacienda y Función Pública, 2022. Presupuestos Generales del Estado (PGE) [WWW Document]. Ser. histórica 2006-2018. URL <https://www.hacienda.gob.es>
- Ministerio de Presidencia, 2009. Evaluación del Plan Estratégico de Seguridad Vial 2005-2008. Madrid.
- Ministerio de Transportes, M. y A.U., 2020. Anuario estadístico 2019. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Madrid, Spain.
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), 2022. Informe sobre el sector de autopistas de peaje en España. Serie anual., Serie histórica 1998-2018. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), 2021a. Tráfico en la red de carreteras del estado. Longitud total recorrida por provincia por tipo de vehículo [WWW Document]. Ser. histórica 2007-2015. URL <https://www.mitma.gob.es/> (accessed 6.16.22).
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), 2021b. Anuario estadístico [WWW Document]. Ser. histórica 1998-2019. URL <https://www.mitma.gob.es/> (accessed 6.16.22).
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020. Precios de carburantes y combustibles [WWW Document]. Ser. histórica 1998-2019. URL <https://www.miteco.gob.es/es/> (accessed 6.16.22).
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2018. Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti Anni 2016-2017.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2016. Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti. Anni 2014-2015.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2009. Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti Anni 2007-2008.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2008. Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti Anni 2006-2007.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2002. Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti Anno 2001.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2000. Conto nazionale dei trasporti 1999.
- Ministerstvo dopravy, n.d. Serie: Ročenka dopravy, Ročenka dopravy. Centrum dopravního výzkumu, Prague, Czech Republic.

Capítulo 8: REFERENCIAS

- Montella, A., 2009. Safety Evaluation of Curve Delineation Improvements. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2103 1 , 69–79. doi:10.3141/2103-09
- Morris, C.C., 2006. Generalized linear regression analysis of association of universal helmet laws with motorcyclist fatality rates. *Accid. Anal. Prev.* 38 1 , 142–147. doi:10.1016/j.aap.2005.08.004
- Moundigbaye, M., Rea, W.S., Reed, W.R., 2018. Which panel data estimator should I use?: A corrigendum and extension. *Econ. Open-Access, Open-Assessment E-Journal* 12, 1–31. doi:10.5018/economics-ejournal.ja.2018-4
- Naciones Unidas, 2020. Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2020. New York, USA.
- Navareño, Á., Criado, J.E., Galán, P., 2018a. Valoración del patrimonio viario a partir de los inventarios de la RCE y puesta en valor del patrimonio puntual y lineal de carreteras (2 de 2). *Rutas* 174, 20–35.
- Navareño, Á., Criado, J.E., Galán, P., 2018b. Valoración del patrimonio viario a partir de los inventarios de la RCE y puesta en valor del patrimonio puntual y lineal de carreteras (1 de 2). *Rutas* 173, 13–21.
- Neumayer, E., 2004. Recessions lower (some) mortality rates: *Soc. Sci. Med.* 58 6 , 1037–1047. doi:10.1016/S0277-9536(03)00276-4
- Newey, W.K., West, K.D., 1994. Automatic Lag Selection in Covariance Matrix Estimation. *Rev. Econ. Stud.* 61 4 , 631–653. doi:10.2307/2297912
- Nguyen-Hoang, P., Yeung, R., 2014. Dollars for lives: The effect of highway capital investments on traffic fatalities. *J. Safety Res.* 51, 109–115. doi:10.1016/j.jsr.2014.09.008
- Nikolaou, P., Dimitriou, L., 2018. Evaluation of road safety policies performance across Europe: Results from benchmark analysis for a decade. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 116 June 2018 , 232–246. doi:10.1016/j.tra.2018.06.026
- Nishitatenno, S., Burke, P.J., 2014. The motorcycle Kuznets curve. *J. Transp. Geogr.* 36 2014 , 116–123. doi:10.1016/j.jtrangeo.2014.03.008
- Noland, R.B., Karlaftis, M.G., 2005. Sensitivity of crash models to alternative specifications. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 41 5 , 439–458. doi:10.1016/j.tre.2005.03.002
- Page, Y., 2001. A statistical model to compare road mortality in OECD countries. *Accid. Anal. Prev.* 33 3 , 371–385. doi:10.1016/S0001-4575(00)00051-8
- Pai, C.-W., 2009. Motorcyclist injury severity in angle crashes at T-junctions: Identifying significant factors and analysing what made motorists fail to yield to motorcycles. *Saf. Sci.* 47 8 , 1097–1106. doi:10.1016/j.ssci.2008.12.007
- Papadimitriou, E., Yannis, G., Bijleveld, F., Cardoso, J.L., 2013. Exposure data and risk indicators for safety performance assessment in Europe. *Accid. Anal. Prev.* 60, 371–383. doi:10.1016/j.aap.2013.04.040
- Pardillo Mayora, J.M., Jurado Piña, R., 2009. An assessment of the skid resistance effect on traffic safety under wet-pavement conditions. *Accid. Anal. Prev.* 41 4 , 881–886.

- doi:10.1016/j.aap.2009.05.004
- Parks, R.W., 1967. Efficient Estimation of a System of Regression Equations when Disturbances are Both Serially and Contemporaneously Correlated. *J. Am. Stat. Assoc.* 62 318 , 500. doi:10.2307/2283977
- Paulozzi, L.J., Ryan, G.W., Espitia-Hardeman, V.E., Xi, Y., 2007. Economic development's effect on road transport-related mortality among different types of road users: A cross-sectional international study. *Accid. Anal. Prev.* 39 3 , 606–617. doi:10.1016/j.aap.2006.10.007
- Peltzman, S., 1975. The Effects of Automobile Safety Regulation. *J. Polit. Econ.* 83 4 , 677–725. doi:10.1086/260352
- Pesaran, M.H., 2020. General diagnostic tests for cross-sectional dependence in panels. *Empir. Econ.* doi:10.1007/s00181-020-01875-7
- Poi, A.W.H., Law, T.H., Hamid, H., Mohd Jakarni, F., 2021. Motorcycle to car ownership: The role of road mobility, accessibility and income inequality. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 90 December 2020 , 102650. doi:10.1016/j.trd.2020.102650
- Prais, S.J., Winsten, C.B., 1954. Trend Estimators and Serial Correlation. *Cowles Comm. Discuss. Pap.*
- Pulido, J., Hoyos, J., Martínez-Ruiz, V., Sordo, L., Fernández-Navarro, P., Barrio, G., Regidor, E., 2021. Long-term impact of the 2008 economic crisis in Spain on road traffic collisions mortality by socioeconomic position. *Health Place* 71 September , 102666. doi:10.1016/j.healthplace.2021.102666
- Quddus, M.A., Noland, R.B., Chin, H.C., 2002. An analysis of motorcycle injury and vehicle damage severity using ordered probit models. *J. Safety Res.* 33 4 , 445–462. doi:10.1016/S0022-4375(02)00051-8
- Reed, W.R., Webb, R., 2010. The PCSE Estimator is Good -- Just Not As Good As You Think. *J. Time Ser. Econom.* 2 1 . doi:10.2202/1941-1928.1032
- Road Safety Authority, n.d. Road Collision Factbook. Ballina, Ireland.
- Rodrigue, J.-P., 2020. *The Geography of Transport Systems*. Routledge, Fifth edition. | Abingdon, Oxon ; New York, NY : Routledge, 2020. doi:10.4324/9780429346323
- Rogé, J., Douissembekov, E., Vienne, F., 2012. Low Conspicuity of Motorcycles for Car Drivers. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 54 1 , 14–25. doi:10.1177/0018720811427033
- Rojó, M., Gonzalo-Orden, H., Linares, A., Dell'Olio, L., 2018. Impact of a Lower Conservation Budget on Road Safety Indices. *J. Adv. Transp.* 2018, 1–9. doi:10.1155/2018/9570465
- Rolison, J.J., Hewson, P.J., Hellier, E., Hurst, L., 2013. Risks of High-Powered Motorcycles Among Younger Adults. *Am. J. Public Health* 103 3 , 568–571. doi:10.2105/AJPH.2012.300827
- Ruhm, C.J., 2000. Are Recessions Good for Your Health? *Q. J. Econ.* 115 2 , 617–650. doi:10.1162/003355300554872

- Saeed, T.U., Hall, T., Baroud, H., Volovski, M.J., 2019. Analyzing road crash frequencies with uncorrelated and correlated random-parameters count models: An empirical assessment of multilane highways. *Anal. Methods Accid. Res.* 23, 100101. doi:10.1016/j.amar.2019.100101
- Safaei, N., Zhou, C., Safaei, B., Masoud, A., 2021. Gasoline prices and their relationship to the number of fatal crashes on U.S. roads. *Transp. Eng.* 4 January , 100053. doi:10.1016/j.treng.2021.100053
- Sánchez-González, M.P., Tejada-Ponce, Á., Bonnefoy, J., Escribano-Sotos, F., 2021. Regional conditions and road traffic collisions on rural roads in Chile. *J. Transp. Heal.* 20 August 2020 , 100996. doi:10.1016/j.jth.2020.100996
- Sánchez González, M.P., Escribano Sotos, F., Tejada Ponce, Á., 2018. Impact of provincial characteristics on the number of traffic accident victims on interurban roads in Spain. *Accid. Anal. Prev.* 118, 178–189. doi:10.1016/j.aap.2018.02.015
- Sánchez González, M.P., Tejada Ponce, Á., Escribano Sotos, F., 2020. Interregional inequality and road accident rates in Spain. *Accid. Anal. Prev.* 135 December 2018 , 105347. doi:10.1016/j.aap.2019.105347
- Savolainen, P., Mannering, F., 2007. Probabilistic models of motorcyclists' injury severities in single- and multi-vehicle crashes. *Accid. Anal. Prev.* 39 5 , 955–963. doi:10.1016/j.aap.2006.12.016
- Schipper, F., 2008. *Driving Europe : building Europe on roads in the twentieth century, Technology and European history series ; Foundation for the History of Technology & Aksant Academic Publishers.* doi:https://doi.org/10.6100/IR638670
- Schneider, W.H., Savolainen, P.T., 2011. Comparison of Severity of Motorcyclist Injury by Crash Types. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2265 1 , 70–80. doi:10.3141/2265-08
- Schneider, W.H., Savolainen, P.T., Moore, D.N., 2010. Effects of Horizontal Curvature on Single-Vehicle Motorcycle Crashes along Rural Two-Lane Highways. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2194 1 , 91–98. doi:10.3141/2194-11
- Schwarz, G., 1978. Estimating the Dimension of a Model. *Ann. Stat.* 6 2 . doi:10.1214/aos/1176344136
- Scott, B., 2008. *The Econometrics of Panel Data: Fundamentals and Recent Developments in Theory and Practice*, The American Journal of Medicine.
- Shaheed, M.S., Gkritza, K., 2014. A latent class analysis of single-vehicle motorcycle crash severity outcomes. *Anal. Methods Accid. Res.* 2, 30–38. doi:10.1016/j.amar.2014.03.002
- Shaheed, M.S.B., Gkritza, K., Zhang, W., Hans, Z., 2013. A mixed logit analysis of two-vehicle crash severities involving a motorcycle. *Accid. Anal. Prev.* 61, 119–128. doi:10.1016/j.aap.2013.05.028
- Shankar, V., Mannering, F., 1996. An exploratory multinomial logit analysis of single-vehicle motorcycle accident severity. *J. Safety Res.* 27 3 , 183–194. doi:10.1016/0022-4375(96)00010-2

- Sirajudeen, A.O., Law, T.H., Wong, S.V., Ng, C.P., 2022. The motorcycle deaths to passenger car deaths ratio and economic performance: A panel data analysis. *Accid. Anal. Prev.* 165 December 2021 , 106533. doi:10.1016/j.aap.2021.106533
- Sociedad Estatal de Infraestructuras del Transporte Terrestre (SEITTSA), n.d. Información económica, presupuestaria y estadística [WWW Document]. URL <http://www.seitt.es> (accessed 6.17.22).
- Stamatiadis, N., Deacon, J.A., 1997. Quasi-induced exposure: Methodology and insight. *Accid. Anal. Prev.* 29 1 , 37–52. doi:10.1016/S0001-4575(96)00060-7
- Statistics Norway, 2004. Statistical Yearbook of Norway 2004. Gnist.Akademika, Oslo, Norway.
- Statistics Norway, 2002. Statistical Yearbook of Norway 2002. Gnist.Akademika, Oslo, Norway.
- Statistics Norway, 2001. Statistical Yearbook of Norway 2001. Gnist.Akademika, Oslo, Norway.
- Statistics Norway, 2000. Statistical Yearbook of Norway 2000. Ad Notam Gyldendal, Oslo, Norway.
- Stickley, A., Baburin, A., Jasilionis, D., Krumins, J., Martikainen, P., Kondo, N., Leinsalu, M., 2021. Macroeconomic changes and educational inequalities in traffic fatalities in the Baltic countries and Finland in 2000–2015: a register-based study. *Sci. Rep.* 11 1 , 2397. doi:10.1038/s41598-021-81135-5
- Stipdonk, H., Berends, E., 2008. Distinguishing traffic modes in analysing road safety development. *Accid. Anal. Prev.* 40 4 , 1383–1393. doi:10.1016/j.aap.2008.03.001
- Sun, L.L., Liu, D., Chen, T., He, M.T., 2019. Road traffic safety: An analysis of the cross-effects of economic, road and population factors. *Chinese J. Traumatol. - English Ed.* 22 5 , 290–295. doi:10.1016/j.cjtee.2019.07.004
- Theofilatos, A., Yannis, G., 2014a. A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. *Accid. Anal. Prev.* 72, 244–256. doi:10.1016/j.aap.2014.06.017
- Theofilatos, A., Yannis, G., 2014b. Relationship Between Motorcyclists' Attitudes, Behavior, and Other Attributes With Declared Accident Involvement in Europe. *Traffic Inj. Prev.* 15 2 , 156–164. doi:10.1080/15389588.2013.801554
- Trafikverket, 2018. The Swedish Transport Administration Annual report: 2017.
- Traynor, T.L., 2009. The impact of state level behavioral regulations on traffic fatality rates. *J. Safety Res.* 40 6 , 421–426. doi:10.1016/j.jsr.2009.10.003
- United Nations, 2020a. Improving global road safety, A/RES/74/299 and A/74/304/Corr.1. General Assembly.
- United Nations, 2020b. Global Plan: Decade of action for road safety 2021-230.
- Välilä, T., 2023. Road safety and road infrastructure expenditure: A bivariate analysis. *Transp. Policy* 140 May , 148–162. doi:10.1016/j.tranpol.2023.07.002

Capítulo 8: REFERENCIAS

- van Beeck, E.F., Borsboom, G.J.J., Mackenbach, J.P., 2000. Economic development and traffic accident mortality in the industrialized world, 1962–1990. *Int. J. Epidemiol.* 29 3 , 503–509. doi:10.1093/intjepid/29.3.503
- Van Elslande, P., Elvik, R., 2012. Powered two-wheelers within the traffic system. *Accid. Anal. Prev.* 49, 1–4. doi:10.1016/j.aap.2012.09.007
- Vlahogianni, E.I., 2014. Powered-Two-Wheelers kinematic characteristics and interactions during filtering and overtaking in urban arterials. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 24, 133–145. doi:10.1016/j.trf.2014.04.004
- Vlahogianni, E.I., Yannis, G., Golias, J.C., 2012. Overview of critical risk factors in Power-Two-Wheeler safety. *Accid. Anal. Prev.* 49, 12–22. doi:10.1016/j.aap.2012.04.009
- Wachnicka, J., Palikowska, K., Kustra, W., Kiec, M., 2021. Spatial differentiation of road safety in Europe based on NUTS-2 regions. *Accid. Anal. Prev.* 150 February 2020 , 105849. doi:10.1016/j.aap.2020.105849
- Wagenaar, A.C., 1984. Effects of macroeconomic conditions on the incidence of motor vehicle accidents. *Accid. Anal. Prev.* 16 3 , 191–205. doi:10.1016/0001-4575(84)90013-7
- Walker, G.H., Stanton, N.A., Salmon, P.M., 2011. Cognitive compatibility of motorcyclists and car drivers. *Accid. Anal. Prev.* 43 3 , 878–888. doi:10.1016/j.aap.2010.11.008
- Wang, C., Lu, L., Lu, J., Wang, T., 2016. Correlation between crash avoidance maneuvers and injury severity sustained by motorcyclists in single-vehicle crashes. *Traffic Inj. Prev.* 17 2 , 188–194. doi:10.1080/15389588.2015.1045502
- Waseem, M., Ahmed, A., Saeed, T.U., 2019. Factors affecting motorcyclists' injury severities: An empirical assessment using random parameters logit model with heterogeneity in means and variances. *Accid. Anal. Prev.* 123 March 2018 , 12–19. doi:10.1016/j.aap.2018.10.022
- Washington, S., Karlaftis, M., Mannering, F., Anastasopoulos, P., 2020. *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis*. Chapman and Hall/CRC. doi:10.1201/9780429244018
- Wegman, F., 1995. *Towards sustainably safe road transport in the Netherlands*. Leidschendam.
- Wegman, F., Allsop, R., Antoniou, C., Bergel-Hayat, R., Elvik, R., Lassarre, S., Lloyd, D., Wijnen, W., 2017. How did the economic recession (2008–2010) influence traffic fatalities in OECD-countries? *Accid. Anal. Prev.* 102, 51–59. doi:10.1016/j.aap.2017.01.022
- Wijnen, W., Rietveld, P., 2015. The impact of economic development on road safety: a literature review. *Why Does Road Saf. Improv. When Econ. Times are Hard?* 22–42.
- Wijnen, W., Stipdonk, H., 2016. Social costs of road crashes: An international analysis. *Accid. Anal. Prev.* 94, 97–106. doi:10.1016/j.aap.2016.05.005
- Wilson, F.A., Stimpson, J.P., Hilsenrath, P.E., 2009. Gasoline Prices and Their Relationship to Rising Motorcycle Fatalities, 1990–2007. *Am. J. Public Health* 99 10 , 1753–1758. doi:10.2105/AJPH.2009.159590

- Winston, C., Maheshri, V., Mannering, F., 2006. An exploration of the offset hypothesis using disaggregate data: The case of airbags and antilock brakes. *J. Risk Uncertain.* 32 2 , 83–99. doi:10.1007/s11166-006-8288-7
- Wooldridge, J.M., 2007. Diagnostic Testing, in: *A Companion to Theoretical Econometrics*. Blackwell Publishing Ltd, Malden, MA, USA, pp. 180–200. doi:10.1002/9780470996249.ch10
- World Health Organization (WHO), 2023. Global status report on road safety 2023. Geneva, Switzerland.
- World Health Organization (WHO), 2018. Global status report on road safety 2018. Geneva, Switzerland.
- Wu, D., Hours, M., Martin, J., 2018. Risk factors for motorcycle loss-of-control crashes. *Traffic Inj. Prev.* 19 4 , 433–439. doi:10.1080/15389588.2017.1410145
- Wulf, G., Hancock, P.A., Rahimi, M., 1989. Motorcycle conspicuity: An evaluation and synthesis of influential factors. *J. Safety Res.* 20 4 , 153–176. doi:10.1016/0022-4375(89)90025-X
- Xin, C., Wang, Z., Lee, C., Lin, P.-S., 2017a. Modeling Safety Effects of Horizontal Curve Design on Injury Severity of Single-Motorcycle Crashes with Mixed-Effects Logistic Model. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2637 1 , 38–46. doi:10.3141/2637-05
- Xin, C., Wang, Z., Lin, P.S., Lee, C., Guo, R., 2017b. Safety effects of horizontal curve design on motorcycle crash frequency on rural, two-lane, undivided highways in Florida. *Transp. Res. Rec.* 2637, 1–8. doi:10.3141/2637-01
- Yannis, G., Antoniou, C., Papadimitriou, E., Katsochis, D., 2011. When may road fatalities start to decrease? *J. Safety Res.* 42 1 , 17–25. doi:10.1016/j.jsr.2010.11.003
- Yannis, G., Golias, J., Papadimitriou, E., 2005. Driver age and vehicle engine size effects on fault and severity in young motorcyclists accidents. *Accid. Anal. Prev.* 37 2 , 327–333. doi:10.1016/j.aap.2004.10.003
- Yannis, G., Papadimitriou, E., Folla, K., 2014. Effect of GDP changes on road traffic fatalities. *Saf. Sci.* 63, 42–49. doi:10.1016/j.ssci.2013.10.017
- Yannis, G., Vlahogianni, E.I., Golias, J., Saleh, P., 2010. Road infrastructure and safety of power two wheelers, in: *12th World Congress on Transport Research*. Instituto Superior Técnico (IST), Lisbon, Portugal.
- Yaseen, M.R., Ali, Q., Khan, M.T.I., 2018. General dependencies and causality analysis of road traffic fatalities in OECD countries. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25 20 , 19612–19627. doi:10.1007/s11356-018-2146-4
- Yasin, Y.J., Grivna, M., Abu-Zidan, F.M., 2022. Motorized 2–3 wheelers death rates over a decade: a global study. *World J. Emerg. Surg.* 17 1 , 7. doi:10.1186/s13017-022-00412-4
- Zambon, F., Fedeli, U., Visentin, C., Marchesan, M., Avossa, F., Brocco, S., Spolaore, P., 2007. Evidence-based policy on road safety: the effect of the demerit points system on seat belt use and health outcomes. *J. Epidemiol. & Community Heal.* 61 10 , 877–881. doi:10.1136/jech.2006.057729

Capítulo 8: REFERENCIAS

- Zambon, F., Hasselberg, M., 2006. Socioeconomic differences and motorcycle injuries: Age at risk and injury severity among young drivers. *Accid. Anal. Prev.* 38 6 , 1183–1189. doi:10.1016/j.aap.2006.05.005
- Zhang, S., Xing, Y., Lu, J., Zhang, H.M., 2019. Exploring the Influence of Truck Proportion on Freeway Traffic Safety Using Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System. *J. Adv. Transp.* 2019, 1–13. doi:10.1155/2019/3879385
- Zhang, T., Burke, P.J., 2021. Fuel prices and road deaths: Motorcyclists are different. *Accid. Anal. Prev.* 162 September , 106396. doi:10.1016/j.aap.2021.106396
- Zhu, H., Wilson, F.A., Stimpson, J.P., Hilsenrath, P.E., 2015. Rising gasoline prices increase new motorcycle sales and fatalities. *Inj. Epidemiol.* 2 1 , 23. doi:10.1186/s40621-015-0054-3